



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

# DISSENY I CONSTRUCCIÓ DEL SISTEMA PNEUMÀTIC D'IMPRESSIÓ 3D PER A METALL DUR



Memòria i Annexos

<b>Autor:</b>	Joan Solans Martinez
<b>Director:</b>	Gemma Fargas
<b>Co-Director:</b>	Joan Josep Roa Rovira
<b>Convocatòria:</b>	7/06/2017

Joan Solans Martinez

## Resum

En treballs previs realitzats durant el darrer any acadèmic al Departament de Ciència dels Materials i Eng. Metal·lúrgica de la Universitat Politècnica de Catalunya, s'han determinat els principals problemes d'impressió de materials ceràmics avançats tals com: bombolles d'impressió, força d'impressió insuficient, entre d'altres. Aquests defectes interns generats durant d'impressió, produeixen una reducció de les seves propietats microestructurals (densitat, etc) com de les seves propietats mecàniques (duresa, tenacitat de fractura, etc.)

En aquest treball final de grau, un objectiu secundari és el disseny d'una planta pilot per a la producció de materials ceràmics impresos (base zircònia, carbur de tungstè, etc). Aquest disseny incorpora tant el sistema de dosificació, mesclat com d'impressió. Tan mateix, el principal objectiu d'aquest treball és el disseny i la construcció d'un extrusor de dosificació automàtica mitjançant un sistema pneumàtic, que intentarà solucionar els problemes observats en el treballs previs i millorar les principals mancances que presenta l'extrusor d'engranatges actual. Finalment, l'extrusor pneumàtic dissenyat i construït s'acoblarà a la impressora 3D per tal d'imprimir peces ceràmiques amb una elevada densitat (~ 99% de la teòrica).

## Resumen

En trabajos previos realizados durante el último año académico en el Departamento de Ciencia de los Materiales e Ing. Metalúrgicos de la Universidad Politécnica de Cataluña, se han determinado los principales problemas de impresión de materiales cerámicos avanzados tales como: burbujas de impresión, fuerza de impresión insuficiente, entre otros. Estos defectos internos generados durante de impresión, producen una reducción de sus propiedades microestructurales (densidad, etc) como de sus propiedades mecánicas (dureza, tenacidad de fractura, etc.)

En este trabajo final de grado, un objetivo secundario es el diseño de una planta piloto para la producción de materiales cerámicos impresos (base zirconia, carburo de tungsteno, etc). Este diseño incorpora tanto el sistema de dosificación, mezclado como de impresión. Sin embargo, el principal objetivo de este trabajo es el diseño y la construcción de un extrusor de dosificación automática mediante un sistema neumático, que intentará solucionar los problemas observados en trabajos previos y mejorar las principales carencias que presenta el extrusor de engranajes actual. Finalmente, el extrusor neumático diseñado y construido se acoplará a la impresora 3D para imprimir piezas cerámicas con una elevada densidad (~ 99% de la teórica).

## Abstract

In previous work carried out during the last academic year the Department of Materials Science and Eng. Metal metalworker at the Polytechnic University of Catalonia, have determined the main problems printing advanced ceramic materials such as: bubble printing, print insufficient force, among others. These internal defects generated during printing, produce a reduction of microstructural properties (density, etc.) and mechanical properties (hardness, fracture toughness, etc.) In this final level, a secondary objective is to design a pilot plant for the production of printed ceramics (zirconia base, tungsten carbide, etc.). This design incorporates both the dosing system, as mixed printing. Likewise, the main objective of this work is the design and constructions of an automatic dosing extruder using a pneumatic system, trying to solve problems observed in previous work and improve the main shortcomings presented by the extruder of current gear. Finally, the tire extruder designed and built docked to the 3D printer to print ceramic with high density (~ 99% of the theoretical).



## Agraïments

Simplement, gràcies a l'Adrià Colomines, un geni de la impressió 3D, i sobretot millor amic, sempre confiant amb les meves decisions i criteris per tal de tirar-ho endavant. Juntament també a la Fundació Cim per a deixar-me imprimir en les seves impressores sense haver de pagar.

Moltes gràcies al meu tutor, Joan, gràcies per estar allà i aconseguir uns minuts per els meus dubtes i decaigudes. No hagués pogut fer-ho sense tu.

M'has donat molt suport, gran professor, però com em vas dir el primer dia, prefereixo ser el teu amic que el teu professor. Gràcies.





Índex

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>V</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>1</b>
1.2. Origen del treball i motivació .....	1
1.3. Requeriments previs.....	3
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>5</b>
2.1. Conformat ceràmic .....	5
2.1.1. Compactació isostàtica en fred .....	6
2.1.2. Tècnica Sol-Gel .....	8
2.1.3. Impressió 3D .....	10
2.1.4. Impressió 3D en materials ceràmics .....	14
2.2. Estat de l'art.....	15
2.2.1. WASP.....	15
2.2.2. Laboratoris HRL.....	17
2.2.3. RepRap .....	18
2.3. Estat actual del mètode d'impressió .....	19
<b>3. OBJECTIUS</b>	<b>23</b>
<b>4. PROCEDIMENT EXPERIMENTAL</b>	<b>25</b>
4.1. Hidrogel .....	25
4.2. Formació de l'hidrogel.....	26
4.3. Reologia de les pastes ceràmiques.....	28
<b>5. RESULTATS I DISCUSSIÓ: DESENVOLUPAMENT DEL DISSENY</b>	<b>31</b>
5.1. Requeriments necessaris de l'equip.....	31
5.2. Dimensionament .....	32
5.2.1. Velocitats i cabals.....	33
5.2.2. Viscositat dinàmica del fluid .....	34
5.3. Descripció global.....	36
5.3.1. Funcionament .....	39

5.4.	Descripció específica .....	40
5.4.1.	Motor pas a pas.....	41
5.4.2.	Subjectador del motor i xeringa.....	43
5.4.3.	Base del conducte .....	46
5.4.4.	Unió de l'eix del motor amb el cargol .....	48
5.4.5.	El cargol .....	50
5.4.6.	Adaptador de la subjecció per la impressora 3D .....	54
5.4.7.	Vista explosionada de l'extrusor pneumàtic.....	56
6.	<b>ANÀLISI DE LES FORCES</b> .....	<b>57</b>
7.	<b>IMPACTE AMBIENTAL</b> .....	<b>66</b>
8.	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>67</b>
9.	<b>CONCLUSIONS</b> ..... ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
10.	<b>PRESSUPOST I/O ANÀLISI ECONÒMICA</b> .....	<b>68</b>
11.	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>71</b>
	<b>ANNEX A</b> .....	<b>73</b>

## 1. Prefaci

### 1.2. Origen del treball i motivació

Aquest treball ha sorgit de la simple necessitat d'optimitzar i millorar els principals problemes trobats durant la realització dels següents treballs finals de grau que s'adjunten a continuació i duts a terme en el grup d'investigació CIEFMA (Centre d'Integritat Estructural i Fiabilitat dels Materials), adscrit al Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-BarcelonaTech) durant els períodes 2015-2017:

- (i) Reologia de pastes ceràmiques per impressió 3D. *Any acadèmic:* 2016/2017. *Autor/a:* Clara Navarro Bultó.
- (ii) Impressió 3D de materials ceràmics base zircònia per aplicacions dentals. *Any acadèmic:* 2015/2016. *Autor/a:* Daniel López Moreno.
- (iii) Disseny de materials compostos ceràmics mitjançant impressió 3D. *Any acadèmic:* 2015/2016. *Autor/a:* Javier Lopez Lazaro y Josep Oriol Ribas Sánchez.
- (iv) 3D-printing of advanced ceramic materials. *Any acadèmic:* 2015/2016. *Autor/a:* Lara de Luis Chueca.
- (v) Effect of porosity on the mechanical properties of zirconia based ceramics obtained via 3D-printing. *Any acadèmic:* 2015/2016. *Autor/a:* Ferran Crespo Petit.
- (vi) Caracterització microestructural i mecànica de multicapes base zircònia per impressió 3D. *Any acadèmic:* 2015/2016. *Autor/a:* Alberto Moreno Fina.

Durant el transcurs d'aquests treballs final de grau, s'ha pogut determinar d'una manera acurada les principals problemàtiques (elevada porositat de les mostres impreses, baixa resistència mecànica, força d'impressió insuficient, etc.) que presenta el procés d'impressió de materials ceràmics (com per exemple: zircònia, carbur de tungstè, etc.) amb la impressora RepRapBCN adquirida a la Fundació CIM (BarcelonaTech).

Degut a la problemàtica observada durant el transcurs dels darrers sis treballs final de grau (TFG), ha nascut la motivació d'aquest TFG, en el que principalment es pretén dissenyar i construir un nou capçal d'impressió que permeti imprimir mostres ceràmiques amb la mateixa impressora RepRapBCN, per tal de produir mostres amb un menor porositat i unes propietats mecàniques superior a les obtingudes fins al moment. Tal i com s'ha pogut observar en la literatura, el sistema cada vegada més utilitzat en aquestes aplicacions i que en principi hauria de solucionar els problemes breument descrits anteriorment així com poder imprimir mostres

ceràmiques de manera contínua, ja que fins l'actualitat el volum màxim d'impressió ha estat restringit es limita a la capacitat d'emmagatzematge d'una xeringa, la qual es de  $63\text{mm}^3$ .

Creiem que, amb el disseny d'una planta pilot (planta automàtica) per l'impressió de materials ceràmics així com la construcció d'un nou capçal d'impressió permetrà al grup d'investigació CIEFMA, poder imprimir noves peces ceràmiques amb propietats mecàniques similars a les obtingudes per les rutes convencionals (compactació uniaxial o isostàtiques de peces ceràmiques, etc.). Aquestes peces, presentaran un alt valor industrial (per exemple pròtesis dentals, etc).

### 1.3. Requeriments previs

Per tal de dur a terme aquest projecte, l'estudiant ha de tenir nocions bàsiques de:

- a) Visió 3D, per tal de poder dissenyar la planta pilot d'impressió 3D. Així com el coneixement previ per tal de realitzar els plànols constructius del nou capçal pneumàtic.
- b) Coneixements bàsics d'impressió 3D, per tal d'imprimir el capçal pneumàtic.
- c) Coneixements bàsics de mecànica de fluids (càlcul de pèrdues de càrrega, etc) per tal de dissenyar i construir el capçal pneumàtic d'impressió.
- d) Coneixements bàsics d'electrònica per poder dissenyar el sistema de control del nou capçal d'impressió.
- e) Nocions bàsiques de reologia, per tal de determinar la força necessària del motor d'extrusió, per tal que l'hidrogel carregat amb partícules ceràmiques pugui fluir d'una manera homogènia



## 2. Introducció

En aquesta secció, s'explicarà breument els diferents tipus de conformat que existeixen en l'actualitat. Posteriorment, s'explicarà el sistema de conformat de peces ceràmiques mitjançant la tècnica d'impressió 3D. En aquest apartant, s'explicarà la seva evolució, els diferents modes d'impressió (en funció de la relació qualitat/preu; per tal s'explicaran des de sistemes d'impressió senzills fins als més complexos). Finalment, en aquesta mateixa secció, s'explicaran els mètodes bàsics d'extrusió (mitjançant l'impressió d'un filament de material o emprant un sistema pneumàtic d'impressió entre d'altres).

Posteriorment, es descriurà l'estat actual d'impressió i quines problemàtiques s'hi pot trobar fins l'actualitat (inèrcia en el capçal d'impressió, el processat de pastes ceràmiques i generació de bombolles durant el processament dels hidrogels, etc.)[5][6]

### 2.1. Conformat ceràmic

Recentment, el conformat de nous materials ceràmics durant la darrera dècada ha anat evolucionant fins arribar a imprimir peces ceràmiques amb alt valor afegit. Fins l'aparició de la impressió 3D, els materials ceràmics eren conformats mitjançant les tècniques de compactació isostàtica en fred o en calent, així mitjançant la tècnica sol-gel. Aquestes tècniques de conformat presenten molts avantatges (tal com; elevada densitat; propera a la densitat teòrica del material, baixa porositat, elevades propietats mecàniques, etc.); però, també presenten alguns inconvenients, el principal d'ells es que les peces obtingudes per peces tradicionals es bastant limitada; sent la més comuna, la fabricació de discs. Mitjançant, la impressió 3D, permetrà realitzar mostres ceràmiques amb geometries complexes, i d'aquesta manera reduir el cost de post-processat (per exemple; rectificació de peces ceràmiques, etc) en les peces impreses, ja que aquestes presenten la geometria final desitjada. El principal inconvenient que presenta la tècnica d'impressió 3D, es la contracció de la peça impresa durant el procés de sinterització, la qual s'ha de conèixer el grau de contracció a alta temperatura.

Les tres tècniques mencionades anteriorment, manipulen el material de maneres molt diferents, un dels punts importants és el que fa referència a la microestructura i com es veu afectada aquesta. Per un costat, les mostres compactades **isostàticament**, presenten una molt

bona cohesió una vegada les mostres compactades han estat sotmeses a un procés de sinteritzat, obtenint materials amb una densitat aproximada del 99% la densitat teòrica del material. Per altre banda la **impressió 3D** i la tècnica **Sol-Gel**, produeixen un producte amb una alta porositat degut a la falta de compactació i a la incorporació d'additius que aporten inhomogeneïtats (com per exemple: porositat, etc.) en la microestructura. Aquests additius són necessaris per tal de modificar la viscositat de la mescla ceràmica i d'aquesta manera poder-los extrudir.

A continuació, és descriu cadascuna de les tres tècniques comentades anteriorment.

Aquestes tres tècniques manipulen el material de maneres molt diferents, un dels punts importants és el que fa referència a la microestructura i com es veu afectada aquesta. Per un costat la compactació isostàtica finalitza amb un producte amb una molt bona cohesió. On els grans s'han unit a causa de la pressió aplicada, obtenint materials amb una densitat pràcticament del 99% la densitat teòrica del material una vegada el material ha estat sotmès a un procés de sinterització. Per altre banda la impressió 3D i la tècnica Sol-Gel, produeixen un producte amb una alta porositat degut a la falta de compactació i a la incorporació d'additius que aporten inhomogeneïtats (com per exemple: porositat, etc.) en la microestructura, necessaris per modificar la viscositat del ceràmic i d'aquesta manera poder-lo extrudir.

### **2.1.1. Compactació isostàtica en fred**

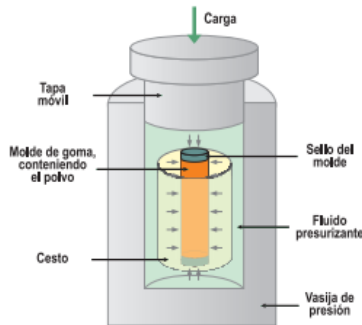
La compactació isostàtica en fred, és una etapa del procés per obtenir materials ceràmics a partir de la pulvimetal·lúrgia. On a partir d'un material en pols s'acaba obtenint el material final. Mitjançant la utilització de pols, es pretén obtenir un material homogeni lliure de defectes.

La compactació isostàtica és una tècnica de conformat. Aquesta va ser utilitzada per primer cop al 1913 per H. D. Madden, per compactar metalls. Actualment segueix sent la tècnica de compactació de pols més utilitzada per materials metàl·lics i ceràmics. Més endavant estudis duts a terme per Turner i Ashby, van ajudar a entendre amb profunditat els efectes que produïa aquesta tècnica als materials.

Una de les principals avantatges, és la obtenció d'un material amb una geometria similar a la del material final. En addició aquest procés ajuda a obtenir una millora de les propietats mecàniques del material, com les que es podrien obtenir mitjançant altres tècniques convencionals.



La compactació isostàtica, permet obtenir provetes amb una densitat del 99% del valor teòric del material. D'aquesta manera es poden obtenir mostres amb una porositat molt baixa i unes millors propietats mecàniques.



**Figura 2.1** Procés de la compactació isostàtica en fred

La **Figura [2.1]**, mostra un esquema d'una màquina típica de compactació isostàtica en fred. El funcionament bàsic d'aquesta tècnica es basa en l'aplicació d'una alta pressió uniforme en totes les direccions (isostàtica) a una pols de diferent granulometria, dipositada dins d'un motlle elastomèric, que té una geometria determinada segons el disseny de la peça que es vol aconseguir. L'espessor del motlle varia entre 1,5 i 3 mm, però s'ha demostrat darrerament que l'espessor de les parets no influeixen sobre el resultat final.

Per transmetre la pressió, el medi més utilitzat és oli o aigua amb algun additiu de corrosió, per tal de no oxidar l'aparell de compactació. Les pressions de compactació poden variar entre els 200 i els 760 MPa [5], i sempre es realitzar el procés a temperatura ambient.

El resultat d'aquesta compactació és un material en "verd" (sense sinteritzar), suficientment resistent per poder ser manipulat, i poder ser transportat al forn per la seva posterior sinterització.

L'eficiència del premsat depèn principalment de la pols utilitzada, ja que depèn de la seva granulometria. De la mateixa manera, també s'utilitzen elements lubricants per afavorir el procés de compactació.

Un dels problemes més significatius, és la reducció de volum que experimenta el material degut al procés de sinterització, entre un 40 i 50% en el cas dels ceràmics amb una granulometria major (entre 44 y 400  $\mu\text{m}$ ) [5].

Dins d'aquesta tècnica, es poden utilitzar dos tipus diferents de motlle: motlle fixe i motlle lliure. En un dels casos el motlle sempre es manté dins de la camisa (fixe), mentre que en l'altre cas el motlle es pot extreure (lliure). Mantenir el motlle permanentment a dins permet agilitzar la producció d'un sol disseny, utilitzant-se principalment per la fabricació en sèrie.

### 2.1.2. Tècnica Sol-Gel

La tècnica sol-gel, es basa en l'obtenció de materials òxids mitjançant la preparació d'una solució. Una "sol", és una dispersió de partícules sòlides de diàmetre inferior a 100nm en una fase líquida, on aquestes partícules es troben suspeses. Apareix de la necessitat de sinteritzar materials controlant la porositat de la seva microestructura. Permeten transformar la solució en un "gelatina" a pressions i temperatures ambientals.

El mètode Sol-Gel va ser utilitzat per primer cop l'any 1860 per Thomas Graham[7], però no es va començar a desenvolupar fins més endavant per Rustum Roy. Encara que aquest mètode es conegui des de principis del segle XX, no ha estat fins les últimes dècades que s'ha utilitzat en la preparació de diversos materials, per tal de controlar les seves propietats i textures.

Durant el procés, es produeixen un seguit de reaccions químiques molt importants depenen de la textura i de les propietats que es volen aconseguir, com les que es mostren en la Figura [2.2.] En aquesta figura es veu el procés de formació Sol-Gel, i algunes de les seves opcions de processament:

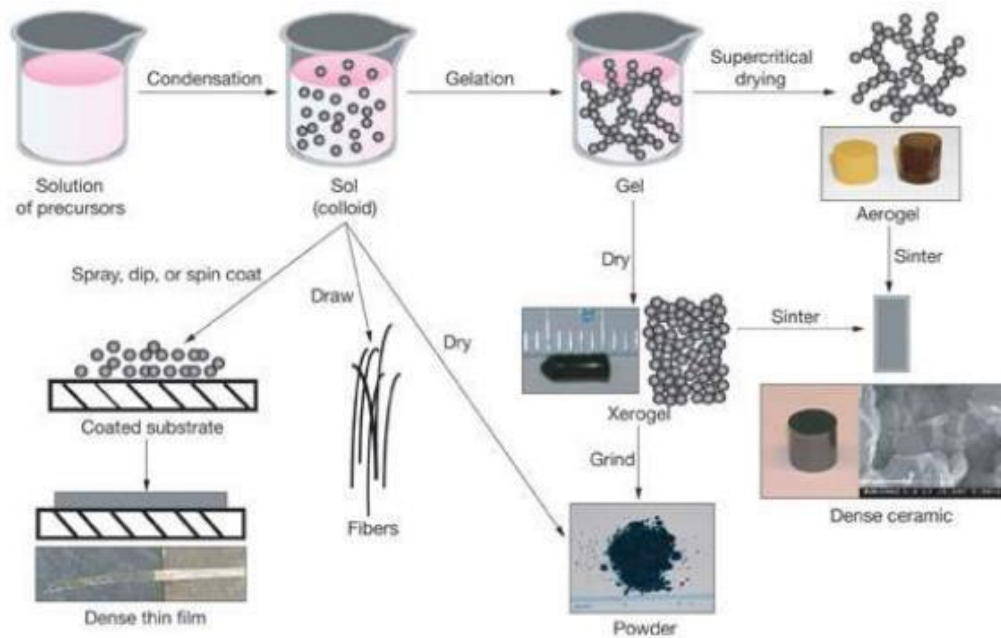


Figura 2.2 Procés de fabricació amb la tècnica Sol-Gel

- Primerament es realitza una solució aquosa amb la pols del material i l'element gelificant.
- Posteriorment s'escalfa la mescla, per tal d'homogeneïtzar la solució, on les partícules de la pols quedaran en suspensió, i no precipitaran.
- Un cop finalitzada aquesta barreja, es deixa refredar i adquireix una textura similar a la de la gelatina.

Finalment, apareix un últim pas, el de l'assecamment. La tècnica sol-gel aquosa un dels principalment inconvenients que té, és l'ús d'aigua en la solució, aquest element fa que un cop s'evapora

i es produeixi una important reducció del volum, que s'ha de tindre molt en compte a l'hora de calcular les dimensions finals requerides.

Com es pot observar en la **Figura 11**, aquesta tècnica de fabricació ve seguida d'una etapa de post-processat tal com la sinterització.

La rigidesa que adquireix el gel, prové de la migració dels seus àtoms durant l'assecamment, augmentant la homogeneïtat a nivell molecular. Les dimensions de partícules que s'obtenen ronden els 20-50 nm, que ajuden a la densificació dels compostos a més baixes temperatures que els obtinguts per mètodes tradicionals.

### 2.1.3. Impressió 3D

‘El primer mètode d'impressió 3D va ser creat el 1983 pel nord-americà Charles Hull, un inventor destacat en el camp de l'òptica iònica, donant lloc a la ‘estereolitografia’ ó fotopolimerització.

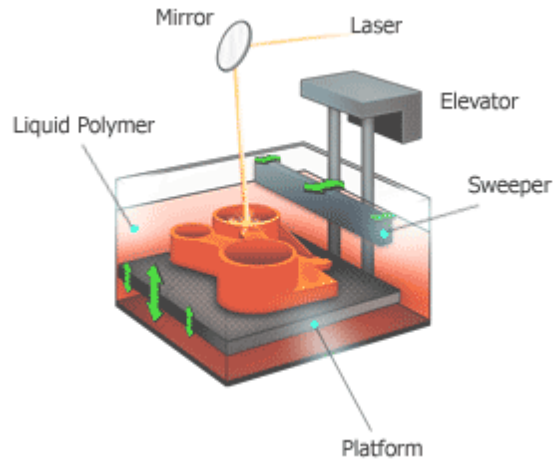
Es tractava d'un procés de fabricació per addició que emprava resina que cura mitjançant llum ultraviolada (UV) en un tanc, i un làser ultraviolada per construir els objectes amb la geometria desitjada.

D'aquell sistema innovador van anar sorgint tècniques que es descriuran a continuació:

#### 2.1.3.1. Estereolitografia

El 1988, a través de l'empresa 3D Systems creada pel mateix Charles Hull, es comercialitzen les primeres màquines d'impressió estereolitogràfiques, veure figura [2.3].

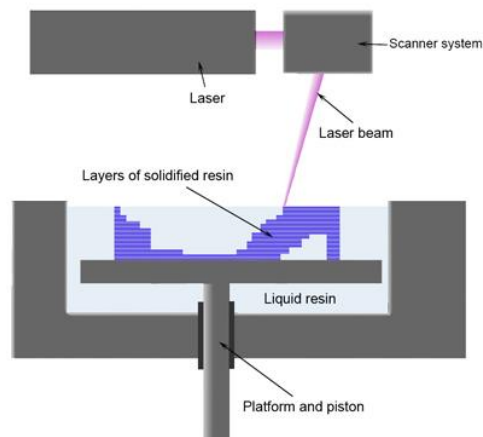
Joan Solans Martinez



**Figura 2.3** Màquina d'impressió mitjançant el procés estereolitogràfic[9]

**Estereolitografia:** La estereolitografia (SLA o SL; també coneguda com fabricació òptica, foto-solidificació entre altres, veure **Figura [2.4]** és una tecnologia de manufactura (o impressió 3D) utilitzada per a la producció de models, prototips, patrons, o peces definitives.[8]

És la tècnica de prototipat i fabricació ràpida més antiga.



**Figura 2.4** Esquema de la impressió estereolitogràfica[8]

És un procés de fabricació per addició que empra resina que cura mitjançant llum UV en un tanc, i un làser ultraviolada per construir els objectes. Els objectes tridimensionals són obtinguts mitjançant l'addició de fines capes, impreses una damunt d'una altra.

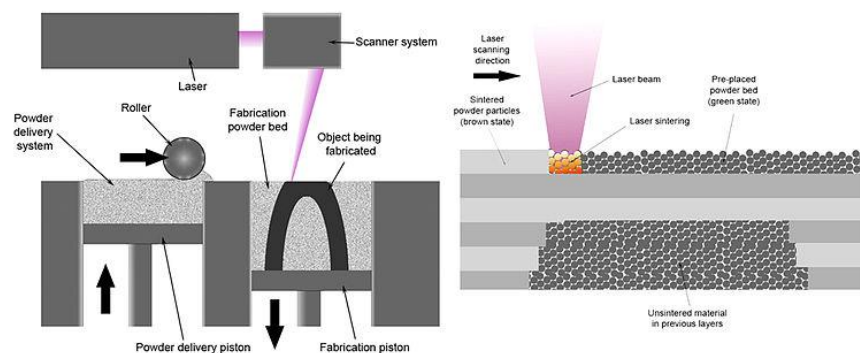
Cada capa és una secció transversal de l'objecte que el làser traça en la superfície de la resina, que és el material consumible. La resina líquida cura i es solidifica mitjançant l'exposició al làser de llum UV, quedant així la capa recent solidificada a la capa prèviament generada.

Una vegada que la capa a imprimir ha estat creada, la plataforma d'elevació de l'equip descendeix una distància equivalent al gruix d'una nova capa de resina solidificada (típicament entre 0,05 i 0,15 mm[9]). Això va deixant una nova capa de resina líquida a la superfície de la cubeta, la qual ja està preparada per a la següent impressió del làser. D'aquesta manera es va creant, capa a capa la peça desitjada amb una peça tridimensional. Una vegada que la peça tridimensional s'ha completat, aquesta es submergeix en un bany químic que retira l'excés de resina i, posteriorment, la peça 3D es curada en un forn de llum UV.

La estereolitografia necessita d'estructures de suport que permeten anar creant capa a capa la peça desitjada en l'interior de la plataforma d'elevació de manera que s'eviti la deflecció de la peça per gravetat. Tanmateix, la secció transversal de la peça es troba ancorada en un extrem del bany de resina per tal d'evitar que la peça que es va generant capa a capa llisqui quan passa el full de re-aplicació de resina. Els suports solen ser generats automàticament durant la preparació del model per ordinador CAD. Aquest punts d'ancoratge, s'han d'extreure de la peça fabricada de manera manual una vegada s'ha finalitzat el procés d'impressió.

### 2.1.3.2. FDM (Fused Deposed Modelling)

Entre 1988 i 1990 es desenvolupen nous mètodes d'impressió principalment per deposició de material fos (FDM, *Fused Deposed Modelling*) i la impressió per làser (SLS, *Selective Laser Sintering*), veure **Figura [2.5 i 2.6]**, respectivament.[10]



**Figura 2.5** Selective laser sintering process

Consisteix en la impressió per capes. Aquestes impressores estan molt esteses i estudiades per materials polimèrics. Aquestes consten d'una bobina de filaments de polímers de l'ordre de 1,5mm de diàmetre. Mitjançant una transmissió per engranatges s'introdueix el filament dins d'una camisa tèrmica, on és fon el plàstic per de produir filament de l'ordre de les micres. Aquest filament es va dipositant capa sobre capa, reproduint la forma desitjada. El moviment de la base en l'eix "Y", i el moviment del capçal en els eixos "X" y "Z", permeten realitzar peces de moltes geometries diferents. Actualment, aquest procés no s'utilitza únicament per plàstics i actualment s'utilitzen molts materials diversos. Degut a la seva versatilitat i fàcil utilització, han permès que sectors com els de la biomedicina utilitzin aquest procés de conformat per generar materials biocompatibles. En aquest treball de fi de grau, aquesta ha estat la tècnica utilitzada, però canviant el plàstic per un material ceràmic. Per tal d'adaptar la màquina a un material ceràmic se li han realitzat diferents modificacions:

- Eliminació de la camisa tèrmica, ja que no es necessari fondre el material ceràmic.
- Millorar la relació de transmissió per augmentar la força de l'extrusor, degut a l'alta viscositat del ceràmic.
- Canviar l'extrusor de plàstics, per dues xeringues i un èmbol que extrudeixen el material. D'aquesta manera el ceràmic sortirà injectat pel capçal de la xeringa. Aquest capçal es pot intercanviar depèn de les dimensions del filament que es vulgui.

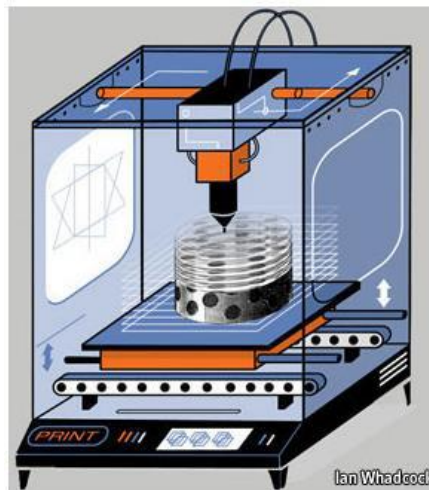


Figura 2.6 Procés d'impressió basat en FDM

El 1993, un grup d'estudiants del Massachusetts Institute of Technology (MIT) concep la impressió digital per injecció. Dos anys més tard (1995) comencen a comercialitzar els primers equips basats en aquesta tecnologia a través de la companyia 3D Systems, creada per Charles Hull en 1988.

L'any 2005, el Doctor Bowyer, de la Universitat de Bath (Regne Unit) desenvolupa la primera màquina 3D auto realitzant: la tecnologia *RepRap*, que suposa un salt endavant en la normalització i accés a les impressores tridimensionals.

El 2009 l'empresa Organovo crea la impressora 3D MMX Bioprinter, la primera capaç de fabricar teixits orgànics'.

#### 2.1.4. Impressió 3D en materials ceràmics

Tal com s'ha observat en l'apartat anterior, l'evolució d'aquestes impressores, es va començar amb els plàstics, materials orgànics tous com per exemple la xocolata.

Però en el sector de la impressió de materials ceràmics, no va ser fins a finals dels anys 90, on un grup d'enginyers van modificar les impressores 3D, per tal d'imprimir-los. Aquesta nova metodologia combinava la impressió de materials ceràmics i posteriorment el procés de sinterització. En l'actualitat hi ha diverses metodologies que s'empren per tal de conformar peces ceràmiques mitjançant aquesta tecnologia; principalment:

- (i) Fused deposit modeling,
- (ii) Materials granulars d'unió,
- (iii) Laminació,
- (iv) Fotopolimerització i
- (v) Estereolipografia basat en Màscara d'imatge de projecció.

Aquest tipus d'impressió utilitza la metodologia **FDM** que és la tècnica que s'utilitza en totes les impressores 3D convencionals, principalment de materials polimèrics.

Aquest és la principal metodologia utilitzada en la fabricació de peces ceràmiques impreses en el grup de recerca CIEFMA. Aquesta metodologia, es basa en imprimir un hidrogel polimèric carregat



amb partícules ceràmiques i posteriorment les peces han de ser sotmeses a un procés de sinteritzat. Mitjançant aquest procés de sinteritzat, la peça impresa, la transforma en un producte compacte, dens i coherent.

A la sinterització les partícules s'uneixen per difusió atòmica en estat sòlid a elevades temperatures (sempre per sota la temperatura de fusió o vitrificació del compost que es desitja sinteritzar). En aquest procés, es produeix difusió atòmica entre les superfícies de contacte de les partícules ceràmiques, reduint la porositat existent entre elles i unint-les químicament, veure

**Figura 2.6**



**Figura 2.6** Partícules després de sinteritzar[11]

## 2.2. Estat de l'art

Actualment, la impressió de ceràmic està en fase de desenvolupament. Fins ara, la tècnica més vàlida era la de impressió de plàstic a partir d'unes bobines polimèriques i d'una resistència que el calenta fins a temperatures pròximes a la temperatura de fusió del material polimèric que el permet extrudir. Cada vegada, degut a les necessitats emergents de la societat actual, hi ha grans empreses pioneres que intenten desenvolupar noves impressores i prototips molt vàlids per dissenyar nous materials. Les principals empreses/centres són breument descrits a continuació.

### 2.2.1. WASP

CSP (Centre de Desenvolupament de Projectes) va ser fundada el 2003 a partir d'una dècada en el món de l'electrònica i la mecànica del seu fundador, Massimo Moretti.[3] És una empresa que s'ocupa del desenvolupament de projectes innovadors: *la recerca continua i l'avantguarda són les pedres angulars d'una obra que es basa en el desig de deixar un món millor que el que s'ha trobat i la confiança en la tecnologia bàsica del progrés sostenible.*

WASP(World Avanced Saving Project ), va ser creada el 2012, un projecte centrat en el desenvolupament de la impressió en 3D que té les seves arrels en el món de codi obert, amb la intenció de tornar i compartir el coneixement i donar eines en circulació.

WASP produeix impressores professionals sòlides amb la intenció de promoure el desenvolupament sostenible i l'autoproducció.

El producte de la venda d'impressores 3D s'inverteix en investigació i desenvolupament de projectes integrats amb vista a la producció d'una revolució que porta una prosperitat generalitzada.

La investigació, que està duent a terme en paral·lel en el context dels materials de sistemes sostenibles i funcionals i innovadores. Els projectes realitzats fins ara pel grup són completament autofinançat. Un dels principals objectius d'aquesta empresa és la impressió de cases km 0; per tant emprant els materials disponibles a la zona on és volen construir aquestes cases, veure **Imatge 2.1**. Tal projecte requereix que la màquina (o impressora 3D) empri el consum d'energia de la zona. Principalment, que el cost associat en el procés de impressió sigui baix, ja que aquest tipus de projectes és duen a terme en zones del planeta on l'electricitat està totalment absent. Per tant, cal ser capaç d'utilitzar fonts d'energia renovables com el sol, el vent i l'aigua. Actualment, aquesta companyia ha desenvolupat una impressora 3D, coneguda amb el nom de Bigdelta[3], d'uns 12 m d'altura i la qual pot ser muntada en 1 h, aproximadament per tres persones, veure **Imatge 2.1**. L'energia bàsica que utilitza per al seu funcionament és l'energia solar, concretament d'uns pocs metres quadrats de panells solars.



**Imatge 2.1** Creació d'una casa mitjançant impressió 3D

Aquesta companyia, a part de la impressora comentada anteriorment, també té moltes altres impressores, principalment a nivell d'usuari. La majoria d'elles, però principalment les impressores de materials ceràmics, base argila, és la implementació la idea d'extrudir amb un cargol bisenfi. D'aquesta manera, aquest sistema d'extrusió permet controlar el flux del cabal ceràmic.

Com s'aprecia en la **Imatge 2.2**, el sistema d'extrusió té incorporat un motor pas a pas, que permet girar el bisenfi millorant la precisió en el procés d' impressió.



**Imatge 2.2** Delta Wasp 20 40

### 2.2.2. Laboratoris HRL

*Segons una notícia de "EL PAÍS", publicada el 31.12.2015:*

"Segons el seu procés d'impressió 3D, els hi permet aprofitar totes les principals propietats dels materials ceràmics, com la duresa, la seva resistència mecànica, la seva resistència a la corrosió i a l'abrasió, entre d'altres".

Aquests científics de ciències dels materials i els seus col·legues dels Laboratoris HRL (Hughes Research Laboratory) han trobat la manera d'evitar els problemes que planteja aquest material amb unes propietats tant diferents; durs i fràgils alhora. Comenten que fins ara els elements ceràmics eren molt difícils de fabricar per aquestes tècniques d'impressió, perquè necessiten ser consolidats mitjançant sintetitzat de la pols, el que introdueix el problema de la porositat i limitada en el procés de fabricació de geometries complexes a aconseguir com la resistència.

Mitjançant aquesta tecnologia, és pot imprimir emprant els precursors ceràmics com el siloxà o el silazano conjuntament amb resines sensibles a la llum UV, els quals al aplicar-lis una llum UV, s'endureixen emprant la tecnologia SPPW (Structure Polymer Pyrolyzed Way), la qual va endurint la resina seguint un patró determinat.

Fent servir aquesta metodologia, es necessiten de quatre a vuit hores per a tenir una estructura de cinc centímetres. Mentre que amb la metodologia SPPW, es poden imprimir panells de 2 cm de gruix en 60 segons, però la geometria final es limita a malles, bresques d'abella o estructures similars, veure **Figura 2.7**.



Figura 2.7 Impressió en forma de panell SPPW [12]

### 2.2.3. RepRap

La tècnica RepRap també es altament utilitzada per imprimir materials ceràmics, com per exemple la porcellana. Aquesta metodologia ha anat evolucionant cap al camp dels materials ceràmics gràcies a un disseny Belga, **Jonathan Keep**, [13] que ha modificat el capçal d'impressió per extruir materials ceràmics amb l'ajuda d'un compressor, tal com s'observa en la **Figura 2.8**.



Figura 2.8 DELTA 3D PRINTER[13]

Aquestes impressores, utilitzen el mateix mecanisme que s'utilitzarà en el disseny del capçal d'impressió en aquest TFG. La principal diferència entre el sistema dissenyat i el presentat en la **Figura 2.8**, és que no utilitzen èmbol; directament empenyen el fluid, mitjançant l'ajuda d'un compressor.

### 2.3. Estat actual del mètode d'impressió

El sistema actual d'impressió disponible en el grup d'investigació CIEFMA del Departament de Ciència dels Materials i Eng. Metal·lúrgica de la Universitat Politècnica de Catalunya, va ser dissenyat per la Fundació CIM-UPC BarcelonaTech. Aquest sistema d'impressió consta amb un doble capçal; el qual la pasta ceràmica és impresa per un sistema d'engranatges; els quals s'encarreguen d'empènyer l'èmbol conforme el capçal es va movent.

Tal i com s'ha trobat en TFG previs (veure **secció 1.2**), s'han imprès materials ceràmics amb una densitat compresa entre el 70-80% de la teòrica, principalment degut a defectes del mesclat del hidrogel i a problemes d'impressió, com per exemple:

Porositat degut a les bombolles generades durant el procés de fabricació de l'hidrogel i de la impressió.

Força d'impressió insuficient degut a la poca resistència mecànica dels engranatges presents en la impressora actual

Ambdós problemes d'impressió produeix una reducció de les propietats mecàniques de les peces impreses, sent aquestes un 60% inferior a les propietats obtingudes per les tècniques convencionals de conformat.

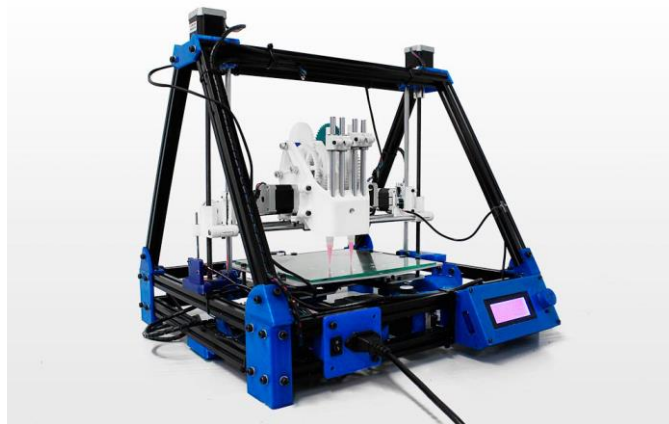


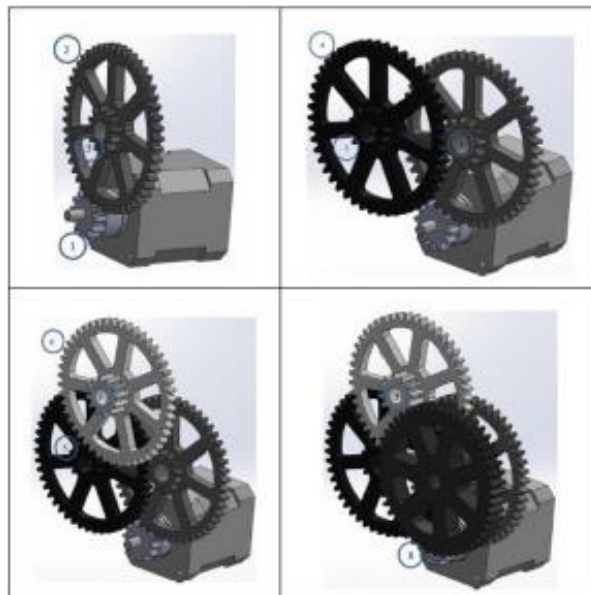
Figura 2.9 BCN 3D+ DUAL PASTE REPRAP[5]



Joan Solans Martinez



**Figura 2.10** Sistema d'engranatges per moure l'èmbol[5]



**Figura 2.11** Composició del sistema d'engranatges[5]

En general la problemàtica de l'actual sistema d'impressió (veure **Figura 2.9**) és pot resumir en:

Alta porositat en les provetes per culpa de les bombolles formades, la qual produeix una baixa densitat del material, inferior al 99% de la densitat teòrica.

Imperfeccions per culpa de la inèrcia d'impressió, i geometria o nombre de capes d'impressió limitada degut al volum de la xeringa(veure **Figura 2.10**).

Per tal de resoldre la principal problemàtica en el procés d'impressió actual, s'hi poden implementar un conjunt de solucions, tals com:

- Aplicar el buit en l'hidrogel una vegada s'ha fabricat,
- Reduir el pes del capçal i evitar un èmbol pesat (d'aquesta manera el moment d'inèrcia durant el procés d'impressió es veu reduït), i utilitzar un sistema de compressió pneumàtic per tal d'evitar forces d'impressió insuficients.

A partir d'aquestes possibles solucions, seran les que s'intentaran implementar en el disseny d'un nou capçal d'impressió pneumàtic.



### 3. Objectius

Actualment la impressió 3D està evolucionant molt ràpidament ja que s'està veient que és un recurs que ens permet generar moltes geometries, cada vegada més complexes, i cada vegada s'aposta per a materials més poc convencionals, com és en el cas d'aquest TFG que s'estudiarà la viabilitat d'extrudir material ceràmic.

Al ser un recurs tan bo, s'està buscant la manera de poder imprimir aquest material sense complicacions i per això s'ha realitzat la reologia del material a imprimir, gràcies al treball de final de grau de la Clara Navarro 'Reologia de material ceràmic per a impressió 3D'.[5]

En aquest TFG, és pretén dissenyar i construir un capçal d'impressió pneumàtic, per tal de resoldre les problemàtiques observades en TFG's previs (com per exemple, porositat dins de les mostres impreses, etc.), les quals estaran descrites posteriorment.

Per tal de poder dissenyar aquest nou capçal, aquest treball es centrarà en les mesures ja preestablertes de la impressora a la qual anirà acoblat. Aquesta impressora és el model BCN3D+ dual paste de la empresa RepRap.

En el que no es centrarà aquest treball és en la instal·lació de l'extrusor a la impressora 3D.

Per últim, per tal de veure que el disseny es viable, es realitzarà un estudi de les forces que s'aplicaran al sistema.



## 4. Procediment experimental

Per tal d'explicar el procediment experimental d'aquest TFG, cal comentar que algun dels punts que s'explicaran a continuació, han sigut gràcies al treball de la Clara Navarro amb el TFG 'Reologia de les pastes ceràmiques per impressió 3D' publicat aquest 2017[6].

En aquest TFG, per tal de fer proves d'impressió i conèixer les forces que actuarien sobre el nou disseny, les quals es podran veure en l'apartat de resultats, s'ha emprat només xeringues amb Hidrogel, sense la càrrega del metall dur ja que encara no es desconeixia el % de WC que havia de contenir l'Hidrogel.

És per tant, s'explicarà què és l'hidrogel, com es forma, i la reologia del metall dur.

### 4.1. Hidrogel

Els hidrogels són el material resultant de la combinació polímer/aigua, constituïts per materials polimèrics capaços de retenir una gran quantitat d'aigua com a conseqüència de la seva arquitectura tridimensional formada per estructures polimèriques entrelaçades. Són materials amb un alt contingut en aigua (fins a un 90% [1]), cosa que els fa molt similars als teixits naturals. Tenen una alta permeabilitat, porositat, flexibilitat per a la fabricació i possibilitat per variar la seva composició i obtenir així les propietats físiques necessàries en funció de l'aplicació desitjada. Els hidrogels poden servir d'andamis "*scaffolds*" que poden actuar entre d'altres com a membrana porosa, és per això que aquest polímer és àmpliament emprat en el camp de la impressió 3D [6].

Els hidrogels es poden classificar de varies maneres, com per exemple:

En **funció de l'origen del gelificant** que forma la xarxa tridimensional, es classifiquen com a naturals, sintètics o híbrids (compostos per una mescla natural i sintètica).

En **funció de la naturalesa química** del entrelaçament de la xarxa, es poden classificar en hidrogels químics, reticulats a través d'enllaços covalents i hidrogels físics, formats per interaccions de caràcter físic.

Al llarg del projecte final de grau, s'ha utilitzat un hidrogel sintètic i físic, el qual presenta les següents característiques: constituït per estructures tridimensionals generades mitjançant

interaccions no covalents, com per exemple, interaccions electrostàtiques, hidròfobes o per ponts d'hidrogen, sent aquesta estructura tridimensional capaç de retenir aigua.

Els hidrogels físics tenen gran importància en l'àmbit de la biomedicina. Sobretot aquells que, en aigua, experimenten una transició de fase reversible deguda a un estímul extern com per exemple; canvi de temperatura, pH, de camp elèctric o de concentració iònica. Si ens centrem en els hidrogels físics termosensibles, aquests depenen de la temperatura i es poden classificar en:

**Hidrogels termosensibles positius:** per sobre d'una determinada temperatura es troben en estat líquid; i el procés de gelidificació es produeix en el procés de refredament, quan la temperatura de la mescla arriba a la "*Upper Critical Solution Temperature, UCST*".

**Hidrogels termosensibles negatius:** per sota d'una determinada temperatura es troben en estat sòlid i la seva gelidificació es produeix en el procés d'escalfament, quan la temperatura de la mescla arriba a la "*Lower Critical Solution Temperature, LCST*". Aquest fenomen es àmpliament conegut com un procés de Gelificació Tèrmica Inversa "*Reverse Thermal Gelation, RTG*". Un exemple típic d'hidrogel termosensible negatiu és el Pluronic F127 (material polimèric emprat en aquest treball final de grau).

## 4.2. Formació de l'hidrogel

Per tal de fer les mescles d'hidrogel (aigua/pluronic), s'ha seguit el procediment detallat a continuació. Les proporcions d'aigua i Pluronic han estat escollides en referència a l'article: "Self-hardening and thermoresponsive alpha tricalcium phosphate/pluronic pastes" que es basa en un pes òptim de Pluronic F-127 del 20% en pes. En base a això, s'ha treballat amb un rang de proporcions d'hidrogel al voltant d'aquest valor per tal de poder escollir la que encaixa més amb les propietats requerides.

La nomenclatura emprada per tal d'identificar l'hidrogel ha estat:

**MX/YY**; on *M* fa referència a l'abreviació de mostra, *XX* al tant per cent en pes d'aigua i *YY* al tant per cent en pes de Pluronic F-127. En la **Taula 1** és resumeixen les nomenclatures i les proporcions de cada fase constitutiva de l'hidrogel emprat en aquest treball final de grau.

**Taula 1** Taula amb les proporcions d'aigua i Pluronic per a l'obtenció de l'hidrogel. Els valors de la taula estan en tant per cent en pes.

Nomenclatura	Aigua (%)	Pluronic F-127 (%)
<b>M85/15</b>	85	15
<b>M80/20</b>	80	20
<b>M75/25</b>	75	25
<b>M60/40</b>	60	40

En primer lloc es col·loca la proporció aigua que es necessiti en un flasc, on és durà a terme la mescla, en una balança (METTLER TOLEDO XS205 DualRange); veure **Imatge 4.1** on es pesa i es tara. A continuació s'addiciona la quantitat exacta de Pluronic F-127, (veure **Taula 1**). Posteriorment, per tal de facilitar el procés de mescla s'afegeix la mateixa quantitat d'aigua destil·lada que de Pluronic F-127 i acte seguit es mescla durant 5 min. a 3500 rpm (SpeedMixer™ DAC 150.1 FVZ-K; veure **Figura 4.2**). Posteriorment, s'afegeix la resta d'aigua que faltava i es torna a barrejar les vegades que sigui necessari a 3500 rpm en cicles de 5 min. fins que quedi tota la mescla homogènia sense aglomerats del copolímer. A continuació la mescla es disposa a la nevera a 4°C durant 24 h per fer líquida la mescla i així des gasificar-la ja que en el procés de mesclat s'introdueix una gran quantitat d'aire.



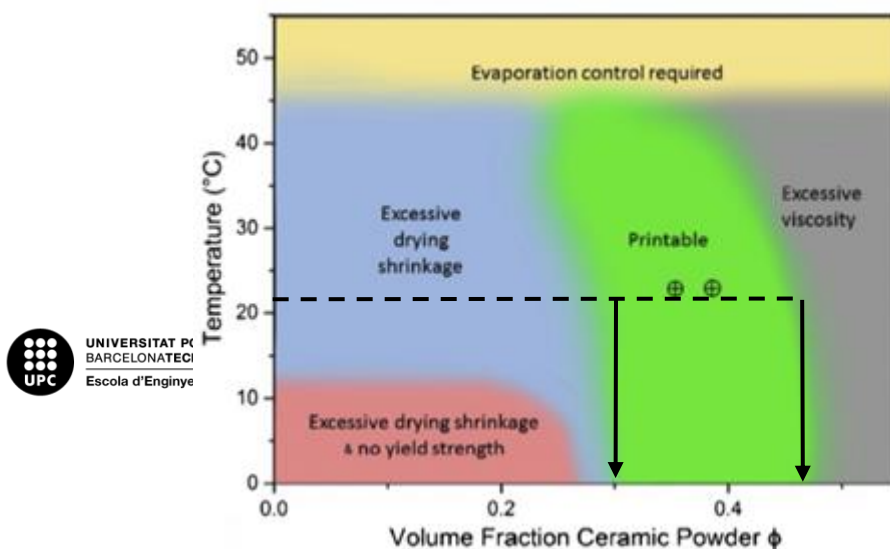
Imatge 4.1 METTLER TOLEDO XS205 DualRange [5]



Imatge 4.2 SpeedMixerTM DAC 150.1 FVZ-K [5]

### 4.3. Reologia de les pastes ceràmiques

Un cop obtingut els hidrogels d'estudi, es procedeix a carregar-los amb la càrrega ceràmica (carbur de tungstè, CW). Com es justifica a l'article "*Robocasting of structural ceramic parts with hydrogel inks*", les proporcions de material ceràmic que se li han d'introduir han d'estar compreses entre un 30 i 45% si la temperatura d'impressió es d' aproximadament 20°C "temperatura del laboratori" Veure(Figura 8). Tal com s'aprecia en aquesta figura, si la carga ceràmica es inferior al 30%, el material imprès no mantindrà la coexistència, per contra si supera el  $\approx 45\%$ , la pasta tindrà



una viscositat massa gran i serà pràcticament impossible poder-la imprimir.

En el treball de la clara, s'ha estudiat tres càrregues ceràmiques diferents: 30%, 37% i 45% per tal d'avaluar quina de les tres és comporta millor en el procés d'impressió.

El procés emprat per carregar les diverses mescles d'hidrogel amb la càrrega ceràmica, es descriu breument a continuació:

- (1) Pesar i tarar el recipient on es realitzarà la mescla.
- (2) Pesar la quantitat exacta de l'hidrogel.
- (3) Addicionar la quantitat exacta de càrrega ceràmica.
- (4) Introduir el recipient amb la mescla a l'interior del SpeedMixer i mesclar-ho a la màxima velocitat (3500 rpm) durant 20 segons. Aquest procés es repeteix fins que s'introdueix tota la càrrega ceràmica. Es carrega en varies etapes per assegurar la homogeneïtzació de la mescla.
- (5) Emmagatzematge de les mescles en un dessecador a temperatura ambient<sup>1</sup> fins que s'empren per a imprimir.





## 5. Resultats i discussió: Desenvolupament del disseny

En aquesta secció, es presenten els diferents apartats per tal de desenvolupar el disseny d'un capçal pneumàtic d'impressió de materials ceràmics. En aquest apartat, es descriuran breument els següents punts:

- Requeriments necessaris de l'equip
- Dimensionament
- disseny global,
- disseny Específic,
- problemàtica i
- resolució.

### 5.1. Requeriments necessaris de l'equip

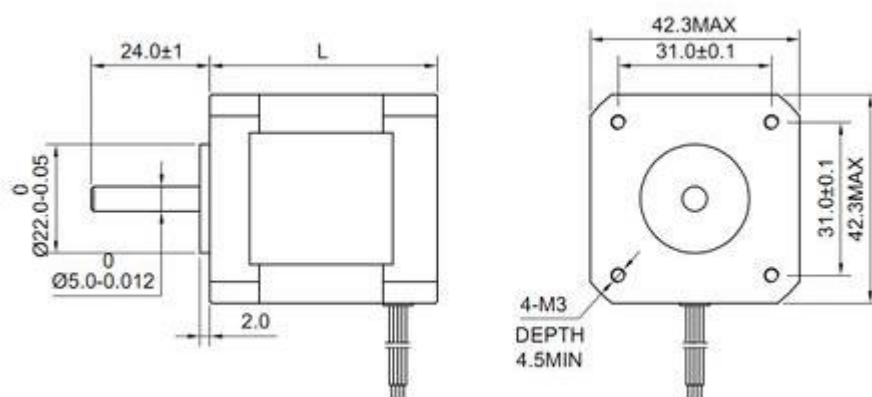
En aquest apartat, és mostraran els requeriments previs per al disseny de l'extrusor pneumàtic de pastes ceràmiques. Aquest extrusor, és dissenyat de forma universal, és a dir, ha sigut sobredimensionat per tal de poder-se adaptar segons els hidrogels ceràmics que és desitgin imprimir. A part del material, s'ha de conèixer la quantitat de pasta ceràmica que és vol imprimir (depenent de les dimensions finals de les peces a imprimir), disseny oportú del sistema per tal de reduir els problemes trobats en els TFGs anteriors (principalment les bombolles generades durant el procés de mesclat), les velocitats d'impressió, la viscositat, entre d'altres.

## 5.2. Dimensionament

Les dimensions d'aquest nou capçal d'impressió ha d'esser igual als capçals subministrats per la Fundació CIM o inferiors, per tal d'acoblar-lo a la impressora 3D del grup de recerca, CIEFMA.

Actualment s'està treballant amb una impressora *BCN3D + dual paste*, (veure **Figura 2.1**) la qual els capçals són més petits ja que hi ha de cabre-hi dos (per tal d'imprimir materials multi components).

La part del dimensionament, també és molt important per la finalitat d'aquest TFG, ja que com més gran sigui l'extrusor, més inèrcies en el recorregut del capçal durant el procés d'impressió acumularà (canvis de sentit o direcció), per tant, com més petit sigui el nou capçal d'impressió, aquesta problemàtica és veurà reduïda. El nou sistema d'extrusió s'ha d'incorporar un cargol bisenfi. Per tant, la grandària d'aquest ha d'esser de les mateixes dimensions que el sistema impulsor de l'extrusor; en aquest cas en particular el motor pas a pas com s'aprecia en la **Figura 5.1**, Les dimensions i les característiques de treball, es poden veure en **L'annex 1**.



**Figura 5.1** Dimensions Nema 17






El motor emprat per aquest nou sistema d'extrusió es troba recollit en l'Annex 1. Les dimensions del motor, no son excessives ja que el par que s'ha d'emprar per extrudir pastes

ceràmiques amb una viscositat compresa entre 30 i 100 mPa·s no ha d'esser excessiu. Les dimensions i les característiques que en treball proporciona, comparat amb els altres NEMA, son suficients per fer les proves inicials d'impressió. Val mencionar que el motor pas a pas emprat en aquest treball és el mateix que s' utilitzen en les impressores 3D RepRap de la Fundació CIM (UPC-BarcelonaTech), i d'aquest manera emprant la mateixa tipologia de motor fa més fàcil la seva correcta implementació en aquesta impressora.

Els “**dataset**” del motor pas a pas, junt amb el sistema, es poden observar en l'**annex 1**

### 5.2.1. Velocitats i cabals

Un altre requeriment a tenir en compte en el disseny del capçal pneumàtic es la velocitat de treball i el cabal d'impressió. Per tal de determinar el cabal d'impressió, s'ha de tenir en compte el diàmetre de la boqueta d'impressió, tal i com s'observa en les **taules 2 i 3** (Dimensions comercials de les boquetes subministrades per la casa NORDSON).

	<b>Puntas cónicas</b>		
	Calibre	Color	ID
	14	Oliva	1,60 mm
	16	Gris	1,19 mm
	18	Verde	0,84 mm
	20	Rosa	0,58 mm
	22	Azul	0,41 mm
	25	Rojo	0,25 mm
	27	Transparente	0,20 mm
<b>Puntas de propósito general</b>			
Calibre	Color	ID	OD
14	Oliva	1,54 mm	1,83 mm
15	Ámbar	1,36 mm	1,65 mm
18	Verde	0,84 mm	1,27 mm
20	Rosa	0,61 mm	0,91 mm
21	Púrpura	0,51 mm	0,82 mm
22	Azul	0,41 mm	0,72 mm
23	Naranja	0,33 mm	0,65 mm
25	Rojo	0,25 mm	0,52 mm
27	Transparente	0,20 mm	0,42 mm
30	Lavanda	0,15 mm	0,31 mm
30		0,10 mm	0,24 mm

Actualment, en el grup d'investigació i en els treballs previs realitzats en el grup d'investigació CIEFMA, s'empra la boqueta d'impressió de 1,54 mm de diàmetre (**Verd Oliva**, veure **Taula 2**). Però un dels requeriments del sistema en qüestió és que aprofitant que s'utilitza un sistema pneumàtic, l'execució fos molt més precisa.

**Taula 2** Característiques puntes  
fines NORDSON

El diàmetre de sortida, és el que determina principalment el cabal d'impressió així com la seva velocitat.

Per tant, els conductes d'extrusió del nou capçal pneumàtic d'impressió depenen principalment de:

- la viscositat dinàmica del fluid,
- la velocitat de la impressora
- les dimensions de la boqueta de sortida.

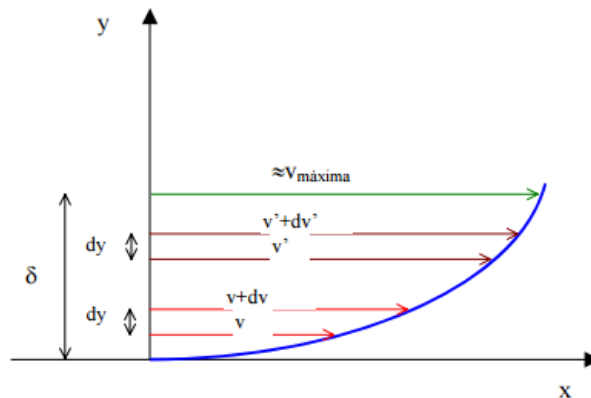
En els següents apartats s'explica breument cadascun dels paràmetres comentats anteriorment.

### 5.2.2. Viscositat dinàmica del fluid

La viscositat d'un fluid representa la resistència que presenta aquest a fluir. La viscositat és una propietat de tots els fluids, tant líquids com gasos, si bé en els últims el seu efecte és gairebé menyspreable.

Físicament, la viscositat dinàmica d'un fluid i/o hidrogel es pot definir com el coeficient de proporcionalitat entre l'esforç tangencial i el gradient de velocitats.

Alguns fluids sotmesos a condicions extremes, deixen de ser viscosos i llavors es diu que presenten superfluïdesa. Aquest fluids sense viscositat se'ls anomena ideals, i no posseeixen capacitat de transmetre el moviment d'una capa de fluid a una altra. Cal dir que de fluids ideals no existeixen però sí que en alguns casos es pot aproximar a la realitat per tal de facilitar els càlculs.

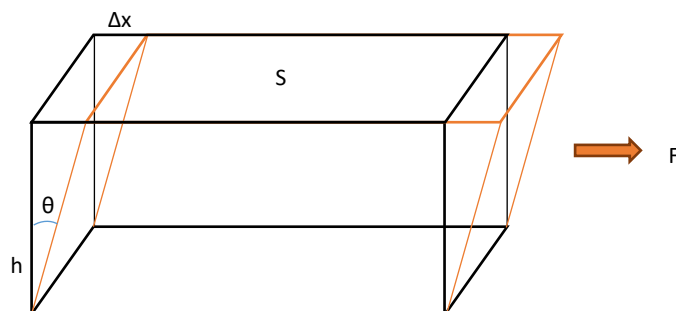


**Figura 5.2** En aquesta gràfica es pot apreciar la velocitat a mesura que ens separem de la paret

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (1)$$

on  $\tau$  es l'esforç de cisalla,  $\eta$  es la viscositat i  $\gamma$  es la velocitat de cisalla.

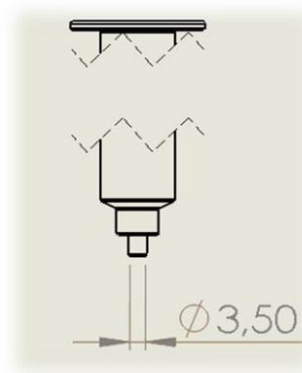
S'observa ara per entendre millor el concepte el paral·lelogram de la **Figura 5.3** de base  $S$  (*fixa*) i alçada,  $h$ .



**Figura 5.3** Paral·lelogram que mostra l'esforç de cisalla

Quan la força  $F$  actua sobre el cos és paral·lela a una de les cares mentre que l'altre es manté fixa. En aquesta situació es presenta un tipus de deformació denominada de cisalla, en el que no hi ha canvi de volum però sí de forma. Si originalment la secció transversal del cos té forma rectangular, sota els efectes d'un esforç de cisalla es converteix en un paral·lelepípede.

Per tant, amb lo que s'ha descrit anteriorment, es pretén inicial el disseny del capçal pneumàtic d'impressió per l'orifici normalitzat de les xeringues d'impressió subministrades per NORDSON, ja que totes elles tenen el mateix diàmetre de sortida, veure **Figura 5.4**.



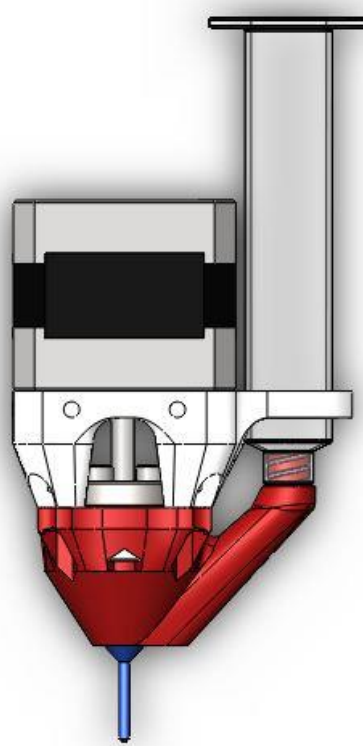
**Figura 5.4** Diàmetre de les xeringues NORDSON

### 5.3. Descripció global

Com s'ha comentat anteriorment, el disseny pneumàtic de l'extrusor es planteja com un sistema d'impressió universal, totalment modificable per a adaptar-se a les necessitats que convinguin al moment d'execució d'una determinada pasta ceràmica.

El disseny del capçal d'impressió, s'ha aconseguir mitjançant un cargol d'Arquímedes, el qual, és el punt fort d'aquest disseny, el qual s'explicarà en les següents seccions.

En la **Figura 5.5** es mostra l'extrusor amb tots els seus components, on totes les peces, menys els components electrònics, són de PLA i han sigut extruïdes amb impressió 3D, gràcies a la Fundació Cim:



**Figura 5.5** Vista de perfil de l'extrusor

Aquesta és la imatge general de l'extrusor pneumàtic, on es poden apreciar les diferents parts que el constitueixen; com per exemple: la xeringa, el motor, el sistema de subjecció del motor, la boqueta i la base. És un disseny senzill, amb un centre de masses bastant centrat, a part el sistema d'extrusió dissenyat és un sistema petit i compacte. El funcionament neral del sistema d'extrusió dissenyat en aquest TFG es descriu a continuació.

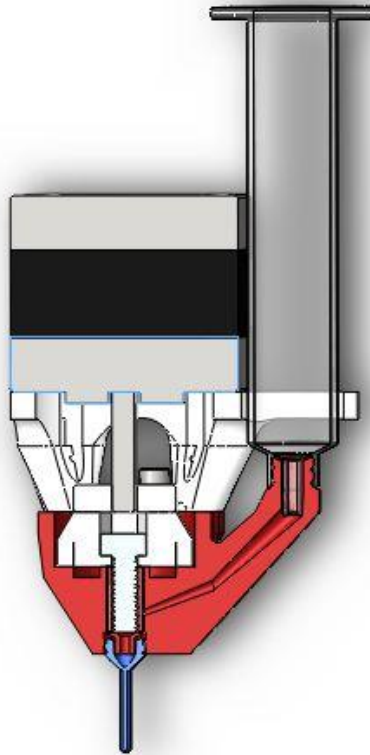


Figura 5.6 Secció de la figura 5.5

En la **Figura 5.6**, es pot apreciar una secció de l'extrusor on s'aprecia l'adaptador de l'eix del motor. Després, existeix una peça que serveix per a donar un parell al cargol hexagonal, on més endavant es mostraran breument les principals característiques. Així mateix, és pot apreciar les dimensions del conducte de distribució de l'hidrogel carregat amb càrrega ceràmica (*el conducte que comença en la xeringa i acaba al cargol M5 de cap hexagonal de pas normal*). I, per últim, però no menys important, hi ha la boqueta, amb l'adaptador universal per a poder-hi enroscar qualsevol boqueta que la casa NORDSON pot subministrar, veure **Taula 2 i 3**. El sistema també duu 8 cargols per a collar tot el sistema descrit anteriorment i presentat en la **secció 5.4.7**.



### 5.3.1. Funcionament

Per tal de descriure el funcionament, es centrarà en la **Figura 5.6**. Inicialment, la xeringa s'haurà d'omplir amb l'hidrogel amb càrrega ceràmica la qual és vol extrudir.

Per tal d'omplir la xeringa, s'ha preparat un material base, fet amb Plurònic, aigua, i el metall dur. 'En les proves al laboratori s'ha descartat el metall dur, ja que s'ha observat en treballs previs que la viscositat amb o sense càrrega ceràmica la viscositat pràcticament és la mateixa e igual a 45 mPa·s tal com és pot observar en [5]. Una vegada s'ha generat l'hidrogel (Pluronic P127 + aigua destilada), aquesta mescla s'introdueix en la nevera a 4°C durant 24 h per tal d'extreure les bombolles generades durant el procés de mesclat. Posteriorment, es procedeix a posar-lo a la xeringa en estat líquid ja que el polímer emprat presenta un comportament dilatant (viscositat inversa)( Veure **Figura 4.1**).

Una vegada s'han tret les bombolles generades durant el procés de mesclat, es deixa calentar l'hidrogel fins que el compost es troba en les condicions d'impressió, 20°C. A aquesta temperatura l'hidrogel passa de l'estat líquid a sòlid, presentant una viscositat compresa entre 30 – 100 mPa·s, depenent de la càrrega polimèrica emprada. A continuació, a la xeringa se li acobla un pistó pneumàtic (adaptador per el compressor, veure **Figura 5.7**), per tal d'empènyer el material el material a extrudir.



**Figura 5.7** Adaptador del compressor a la xeringa

Posteriorment, s'engega el compressor, a la pressió que es defineix a la **secció 6**, i l'aire al comprimir fa empènyer l'èmbol, fent baixar l'hidrogel per el conducte fins a l'extrusor. Per tal de poder controlar el cabal d'impressió, així com la velocitat optima d'impressió, s'han realitzat bastantes proves al laboratori. Posteriorment, ja és pot imprimir l'hidrogel.

Quan es vol imprimir el material, la impressora connectada amb el motor pas a pas, produeix un moviment del motor empenyent la pasta polimèrica cap al sistema d'extrusió; produint un desplaçament de l'hidrogel quan es desitgi. En aquest punt, quan el motor para, crea una depressió en el sistema, cosa que fa que no surti més material.

Una vegada, s'ha explicat breument el funcionament general del capçal d'extrusió, es passa a descriure breument cada peça per separat.

## 5.4. Descripció específica

En aquesta secció, per tal d'entendre com funciona tot el sistema, es descriuen cadascuna de les peces que conté el capçal d'extrusió dissenyat anteriorment:

1. Motor pas a pas,
2. subjectador del motor i xeringa,
3. base del conducte,
4. unió de l'eix del motor al cargol,
5. cargol,
6. adaptador per la impressora, i
7. vista explosionada de l'extrusor pneumàtic.

### 5.4.1. Motor pas a pas

El principal requeriment per escollir el motor pas a pas (veure **Figura XXX**), es que pogués transmetre el par necessari per desplaçar l'hidrogel. Un requeriment imprescindible per a la correcta elecció d'aquest motor es que cada volta de l'eix estigués el més dividit possible per tal de poder millorar en la precisió durant el procés d'impressió; d'aquesta manera parar a temps la dosificació de l'hidrogel en qüestió i no seguir extrudint.



**Figura 5.8** Motor Pas a Pas NEMA17

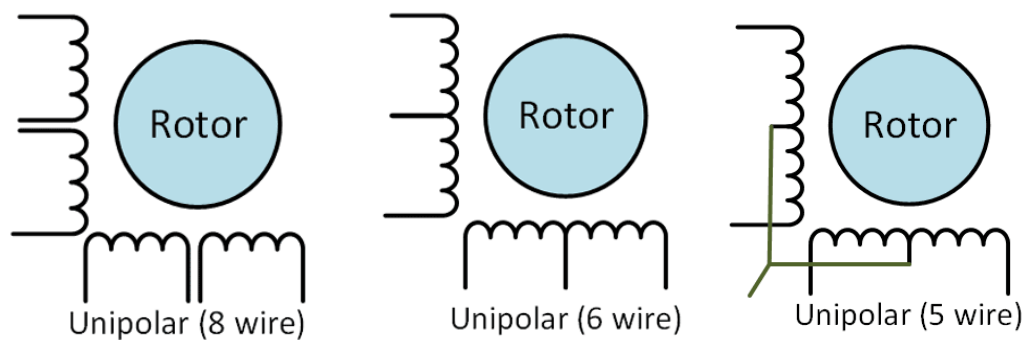
En aquest TFG, s'ha escollit un motor pas a pas Nema 17. Aquesta tipologia de motos presenten un gir de 1,8 graus, son motors bipolars, amb una intensitat màxima de 1,5 A, i treballant a 12V. En altres paraules, aquest motor pas a pas de 1,8 graus vol dir que rep 200 polsos per tal de donar una volta. Tal com s'ha mencionat anteriorment, aquest motor es bipolar. A continuació, és descriu breument la diferència entre motors uni- i bipolars.

#### Motors unipolars:

Internament tenen dues bobines, veure **Figura 5.9**. Cada par es compona, òbviament, de dues bobines, una es magnetitza cap al pol nord i l'altre cap al pol sud. Són els motors més fàcils de programar.

En un moment inicial, el "*driver*" permet que passi la corrent per la bobina que magnetitza cap al pol nord, i en el següent s'encén la que magnetitza cap al pol sud.

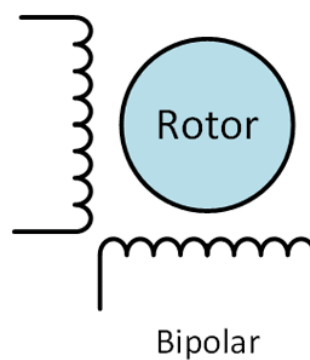
D'aquesta manera el “driver” només s’ha de preocupar d’encendre i apagar les bobines. Això és el més important dels unipolars. El “driver” no entén de nord i sud. Normalment els motors unipolars són els més barats i els menys potents.



**Figura 5.9** Diferents tipus de cablejats de motors unipolars[13]

#### Motors bipolars:

Els motors bipolars, per dins són més senzills que els unipolars, només el conformen dues bobines, veure **Figura 5.10**.



**Figura 5.10** Cròquis cablejat de un motor bipolar[13]

La complexitat d'aquests motors, està en el “*driver*”, que és l'encarregat d'anar canviant la polaritat i en efecte la corrent mentre va encenent les bobines.

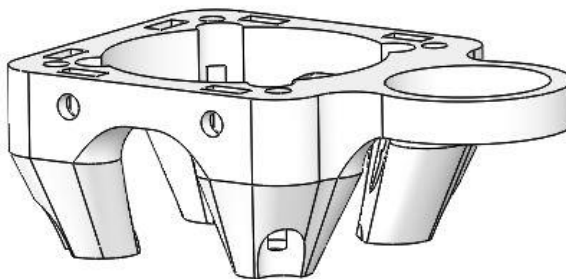
D'aquesta manera, en primer lloc, la corrent viatja cap a una direcció, creant un camp magnètic nord/sud, i en el moment següent la polaritat s'inverteix, creant un camp magnètic sud/nord. En aquest TFG, s'ha escollit un motor bipolar, ja que aquests són més potents i són els que s'usen en les impressores 3D, CNC, etc. A més a més, els “*drivers*” són més avançats i controlen millor la potència i inclouen micro-passos.

El datasheet del motor pas a pas es troba a l'**Annex 1**.

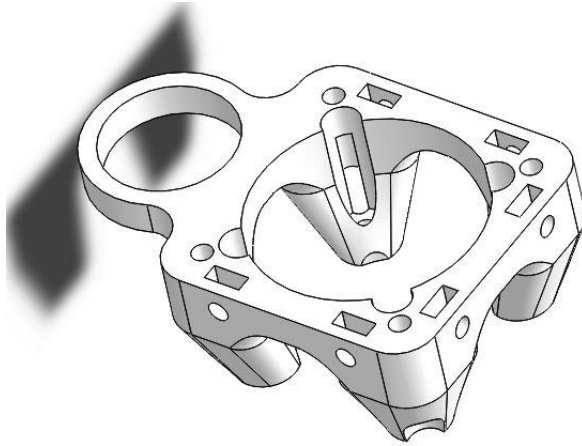
#### 5.4.2. Subjectador del motor i xeringa

Partint de les dimensions del motor (veure **secció 5.4.1**), es va dissenyar aquest subjectador, que també aprofita per aguantar la xeringa i donar-li suport al sistema d'extrusió dissenyat en aquest projecte. Aquest sistema permet aguantar la xeringa d'impressió i d'aquesta manera evitar que no caigui per la pròpia pressió exercida pel compressor.

Aquesta peça s'ajuntarà a la base amb 4 cargols, i a la vegada s'acobla al motor, per això té 8 forats. Els forats laterals, permet unir-ho al sistema d'impressió.



a)



**Figura 5.11** Tant a) com b) són vistes d'aques subjectador

b)

Aquesta peça, igual que les altres han estat impreses per la Fundació CIM (UPC-BarcelonaTech) i el material emprat es PLA. (Acid PoliLàctic)

En aquest treball s'ha usat PLA, per la seva relació qualitat/preu, i a més és el que s'usa en la Fundació Cim.

#### 5.4.2.1. PLA (Acid PoliLàctic)

El PLA o àcid polilàctic és un dels materials més usats en el món de la impressió 3D gràcies a popularització de les impressores d'escriptori amb tecnologia d'extrusió FDM.[14]

L'àcid polilàctic és un és un polímer biodegradable derivat de l'àcid làctic. Es fabrica a partir de recursos renovables al 100%, com són el blat de moro, la remolatxa, el blat i altres productes rics en midó. Aquest termoplàstic té moltes característiques equivalents, i fins i tot millors, que molts dels plàstics derivats del petroli, el que fa que sigui eficaç per a una gran varietat d'usos.

El PLA és en la seva forma normal un polímer permanent i incolor. És resistent a la humitat i al greix. Té característiques de barrera del sabor i l'olor similars al plàstic de polietilè tereftalat, el

famós PET, que és usat com a envàs per a begudes no alcohòliques i per a altres productes no alimentaris.

#### Propietats físiques i mecàniques del PLA

Pel que fa a aspectes físics, químics i mecànics, la resistència a la tracció i el mòdul d'elasticitat del PLA és també comparable al del polietilè. No obstant això, és més hidrofílic que el polietilè, ja que té una densitat més baixa. És a més estable a la llum U.V. sent més difícil la seva decoloració. Quant a la seva inflamabilitat, és massa baixa.

El PLA es pot formular per ser rígid o flexible i pot ser copolimeritzat amb altres materials. El PLA es pot fer amb diverses característiques mecàniques depenent del procés de fabricació seguit.



**Figura 5.12** Diferents bobines de colors les quals es poden fer amb PLA [14]

- Elongació al trencament: 6%
- Mòdul de flexió: 4 GPa
- Resistència a la flexió: 80 MPa
- Temperatura de transició vítria: 60°C
- Temperatura de deflexió de la calor (a 455 kPa): 65°C

- Començament de fusió: 160°C
- Mòdul de tall: 2,4 GPa
- Capacitat calorífica específica: 1800 J / kg-K
- Relació força-pes: 40 kN-m / kg
- Resistència a la tracció (UTS): 50 MPa
- Conductivitat tèrmica: 0,13 W / m-K

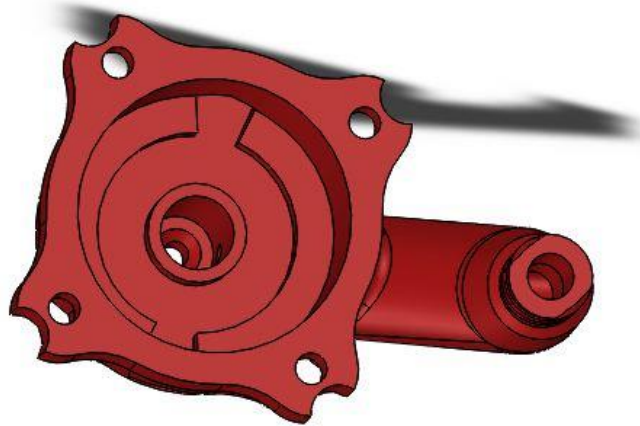
### 5.4.3. Base del conducte

Aquesta peça és la que dosifica el fluid des de la xeringa fins al cargol. Podem veure que, on comença el conducte hi ha un mètric exterior per tal d'unir les xeringues amb el sistema de dosificació.

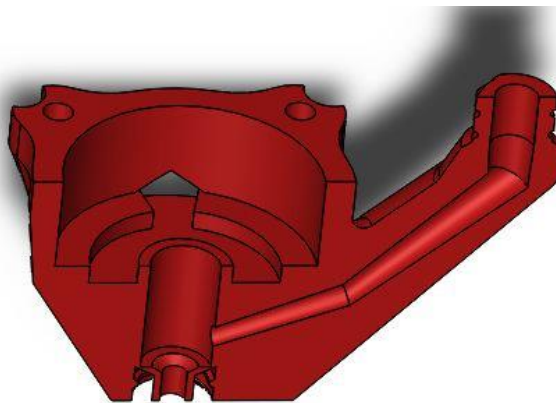
El conducte té una lleugera pendent per afavorir el moviment del fluid cap a l'extrusor, i d'aquesta manera reduir al màxim les pèrdues de pressió per culpa del colze i reduir la pressió subministrada pel compressor.

Val mencionar que aquest sistema, també disposa d'un doble esglaó ubicat en l'interior de l'extrusor; on es col·locarà una junta d'estanqueïtat i evitarà que l'hidrogel flueixi per zones no desitjades. Tanmateix, per facilitar l'observació d'aquesta regió des de l'exterior i veure si l'estanqueïtat no és la desitjada, s'ha dissenyat el capçal per tal de poder observar aquesta regió (forat en forma de triangle, veure **Figura XXX**). Abans que el fluid torni en contracorrent, el fluid sortiria pel forat i ens permetria veure que hi ha problemes en el sistema d'extrusió. El principal inconvenient trobat en aquesta secció, ha estat l'obtenció de l'estanqueïtat entre peça metàl·lica, com seria el cargol, i una peça feta amb PLA, la qual cosa, és pràcticament impossible.



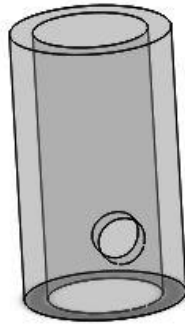


**Figura 5.13** Base la qual conté el conducte interior



**Figura 5.14** Secció de la figura 5.13

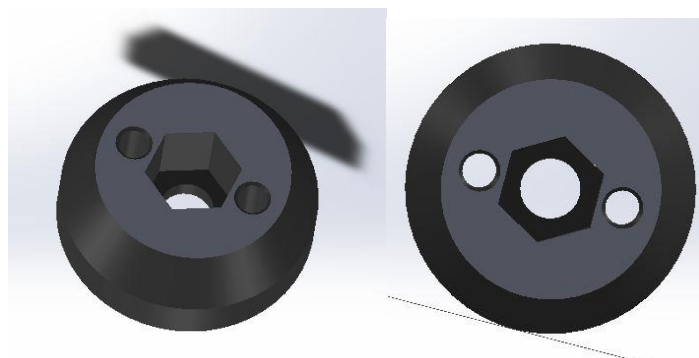
La solució emprada en aquest TFG és la més rudimentària, i la més barata. En aquest TFG es va incorporar un tub de goma, similar al cautxú, amb un determinat torque, per tal d'aconseguir una estanqueïtat perfecta, veure **Figura 5.15** Si es volgués invertir diners, es podria millorar posant-hi una camisa perfectament calibrada, llavors entre el cargol i el tub calibrat s'aconseguiria una estanqueïtat perfecta.



**Figura 5.15** Goma de silicona usada per a crear estanqueïtat

#### 5.4.4. Unió de l'eix del motor amb el cargol

Per tal de donar parell al cargol, es va dissenyar i crear aquesta peça (veure **Figura XXX**), on hi encaixa perfectament el cap, i així aprofitar la geometria hexagonal per donar-li par al cargol sense haver de foradar-lo.

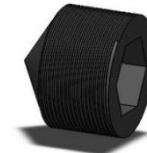


**Figura 5.16** Peça creada per juntar l'eix del motor amb el cargol M5

Aquesta peça ha estat creada a partir d'un presoner d'eixos com es mostra en la **Figura 5.18**.



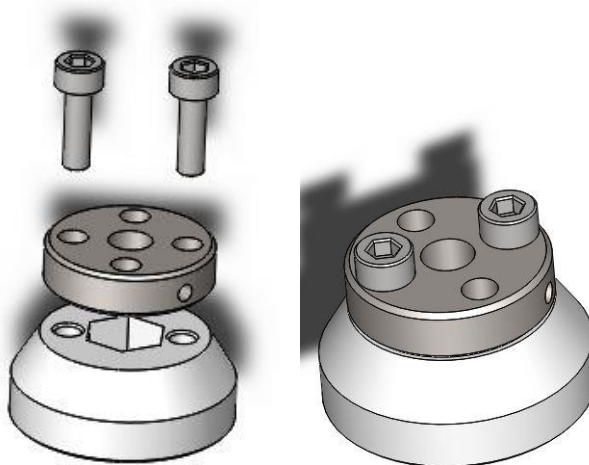
**Figura 5.17** Presoner d'eix de 5mm



**Figura 5.18** Pressoner

L'eix del motor pas a pas, s'introdueix per l'orifici central, i, aprofitant que al final, l'eix té un costat pla, és collat amb una clau utilitzant el presoner de la **Figura 5.17**.

Una vegada el tenim collat, utilitzem dos dels seus quatre forats per tal d'unir-lo a la peça mostrada en la **Figura XXX**. El sistema resultant presenta el mateix par que ens proporciona el motor pas a pas al cargol. Aquest sistema, està constituït per tres components, però el disseny final emprat permet un procés de desmuntatge senzill per tal de poder-lo netejar o regular.



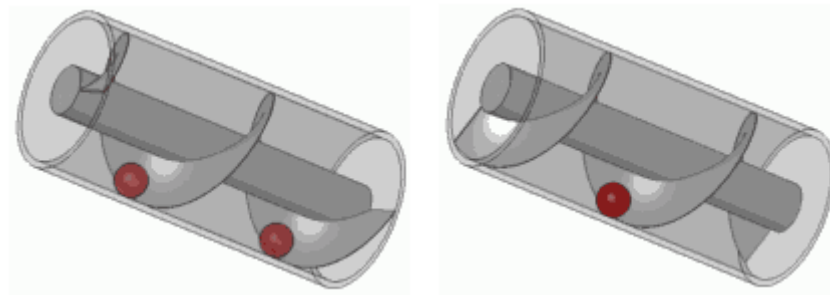
**Figura 5.19** Muntatge del pressoner amb la peça de PLA

### 5.4.5. El cargol

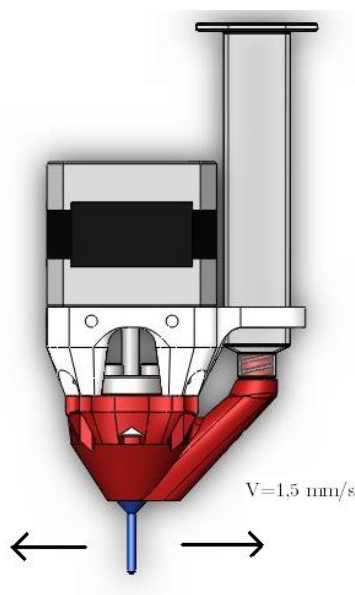
Aquest, és, sense dubte, el punt clau en el disseny i construcció de l'extrusor pneumàtic. Els paràmetres principals de disseny són: conèixer el cabal d'extrusió, el diàmetre i la velocitat d'impressió. Per tant el cargol dissenyat es basa en la teoria del cargol d'Arquímedes, el qual s'explica breument a continuació.

Cargol d'Arquímedes:

El Cargol d'Arquímedes es basa principalment en un cargol que es fa girar dins d'un cilindre buit, situat sobre un pla inclinat, i que permet elevar el cos o fluid situat per sota de l'eix de gir, veure **Figura 5.20**.



**Figura 5.20** Demostració del funcionament del cargol d'Arquímedes[15]



El cargol permet transportar un fluid, amb un flux molt controlat i amb molta potència. És per això que grans empreses com la WASP, ja comentada anteriorment (veure **secció 2.2.1**), ja utilitzen aquest mètode per a imprimir pastes ceràmiques.

Per a dimensionar correctament aquest cargol, el principal paràmetre de disseny ha de ser:

La quantitat de material que ha d'empènyer per volta; el qual ha de ser la mateixa que surti per la boqueta per a que sigui un procés d'extrusió continu.

**Figura 5.21** Velocitat del extrusor

Per tal de dissenyar el cargol, el principal paràmetre que regula el cabal del material a extrudir es la velocitat de moviment de l'extrusor. En aquest TFG s'ha considerat que la velocitat d'impressió es igual a **1,5 mm/s**.

Aquest paràmetre, és la velocitat en la que la impressora es va ajustar per tal de imprimir l'hidrogel, i s'ha considerat constant per al càlcul i disseny d'aquest extrusor.

És a dir, que en 1 segon, l'extrusor imprimeix 1,5 mm d'hidrogel. Per tant, tenint en compte la velocitat d'impressió i el diàmetre de la punta d'impressió, és pot calcular el cabal d'impressió en  $\text{mm}^3/\text{s}$ .

Per tal de trobar el volum mínim d'impressió en  $\text{mm}^3$ , i coneixent el diàmetre de les boquetes subministrades per NORDSON, s'agafarà com a mostra, la boqueta que la seva àrea de sortida s'assimili més a l'àrea que crea el pas d'un cargol.

És per això que em vaig crear unes taules, que podem veure a continuació, amb tots els cabals que poden admetre els mètrics respecte les boquetes que ens proporcionava Nordson.

**Taula 3** Pas, altura i àrea de la secció entre pas i pas del cargol

	Pas(mm)	H (mm)	Area( $\text{mm}^3$ )
M2	0,4	0,346	0,069
M2,5	0,5	0,433	0,108
M3	0,5	0,433	0,108
M3 Pas fi	0,25	0,217	0,027
M4	0,7	0,606	0,212
M4 Pas fi	0,35	0,303	0,053
M5	0,8	0,693	0,277
M5 Pas fi	0,5	0,433	0,108
M6	1	0,866	0,433
M6 Pas fi	0,6	0,520	0,156
M7	1	0,866	0,433
M7 Pas fi	0,75	0,650	0,244

**Taula 4** Diàmetre i àrea de la boqueta de sortida. NORDSON

Boquetes còniques	Diametre Int (mm).	Area
Oliva	1,6	2,011
Gris	1,19	1,112
Verd	0,84	0,554
Rosa	0,58	0,264
Blau	0,41	0,132
Vermell	0,25	0,049
Transparent	0,2	0,031

**Taula 5** Diàmetre i Àrea de les boquetes de punta

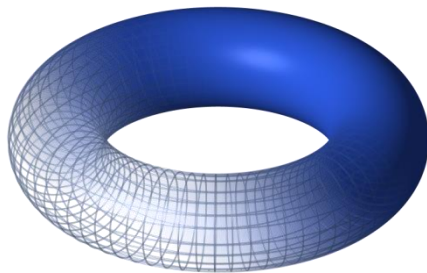
Boquetes de punta	Diametre int (mm)	Area(mm <sup>2</sup> )
Oliva	1,54	1,863
Ambar	1,36	1,453
Verd	0,84	0,554
Rosa	0,61	0,292
Purpura	0,51	0,204
Blau	0,41	0,132
Tronja	0,33	0,086
Vermell	0,25	0,049
Transparent	0,2	0,031
Lavanda	0,15	0,018
Groc	0,1	0,008

#### 5.4.5.1. Els càlculs

Per tal de calcular el volum que s'empeny en cada volta del cargol, s'han realitzat un conjunt de suposicions a partir dels càlculs d'un Toroide.

*Un **toroide** és una forma geomètrica tridimensional generada per extrusió en traslladar el centre d'un cercle al llarg d'una trajectòria corba tancada (una el·lipse o una circumferència) situat en el seu mateix pla. Es tracta doncs d'una superfície de revolució quàdrica, generada per una circumferència que gira al voltant d'un punt del mateix pla del seu eix de gir. Els dònuts i*

*els pneumàtics, per exemple, tenen forma de toroide, i concretament de tor, que és el cas particular al qual la corba tancada és una circumferència.*[16]



**Figura 5.22** Toroide [16]

$$A = 4 \cdot \pi^2 \cdot k \cdot r \quad (2)$$

$$V = 2 \cdot \pi^2 \cdot k \cdot r^2 \quad (3)$$

On  $r$  és el radi del cercle rotat i  $k$  és la longitud entre el cercle i el seu eix de rotació.

Per tal de fer els càlculs més senzills, s'ha menyspreat els graus de baixada que tindria el cargol, per tant s'ha obviat el pas.

Agafant en consideració les següents taules recollides de les taules anteriors (veure **taules 4, 5 i 6**

Mesura normal	Pas(mm)	H(mm)	Area(mm <sup>2</sup> )
M5	0,8	0,693	0,277

Boquetes còniques	Diametre Int (mm).	Area(mm <sup>2</sup> )
Rosa	0,58	0,264

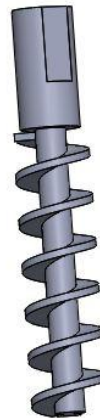
Considerant que el motor gira a 60 rpm i utilitzant les dades resumides en la **Taules 4, 5 i 6** les expressions (2) i (3), s'ha pogut determinar que el cabal d'impressió es de **0,396 mm<sup>3</sup>/s**.

$$Q = 0,396 \text{ mm}^3/\text{s} \quad (4)$$

Una vegada conegut el cabal d'extrusió, s'ha d'escollir el material el qual és realitzarà el cargol bisenfi. Inicialment, es va escollir que és realitzaria de PLA veure **Figura 5.23**, però després de les proves inicial d'impressió és va trencar. Per tant, s'ha emprat un cargol de cap hexagonal (DIN M5) per tal de poder donar el parell desitjat del motor directament, veure **Figura 5.24**



**Figura 5.23** DIN M5



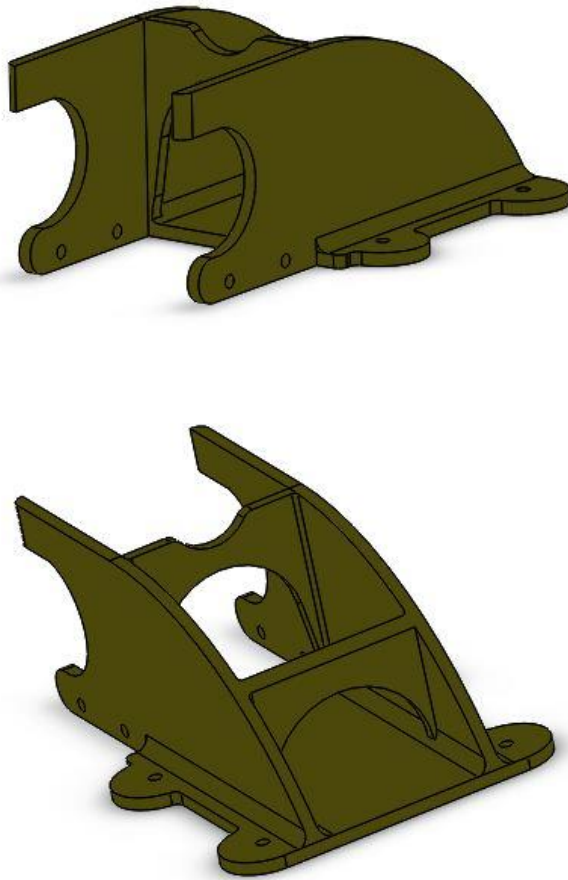
**Figura 5.24** Cargol bisfin extrudit amb PLA

#### 5.4.6. Adaptador de la subjecció per la impressora 3D

El sistema de subjecció de l'extrusor pneumàtic dissenyat anteriorment s'ha de poder acoblar a la impressora BCN3D+ RepRap fabricada per la Fundació CIM (BarcelonaTech). Aquest sistema és subjecta a la impressora mitjançant 4 cargols. A més a més, el sistema de subjecció s'ha dissenyant de forma corba per aguantar millor les forces verticals que haurà de suportar de la pressió del compressor, veure **Figura 5.25**.



Joan Solans Martinez

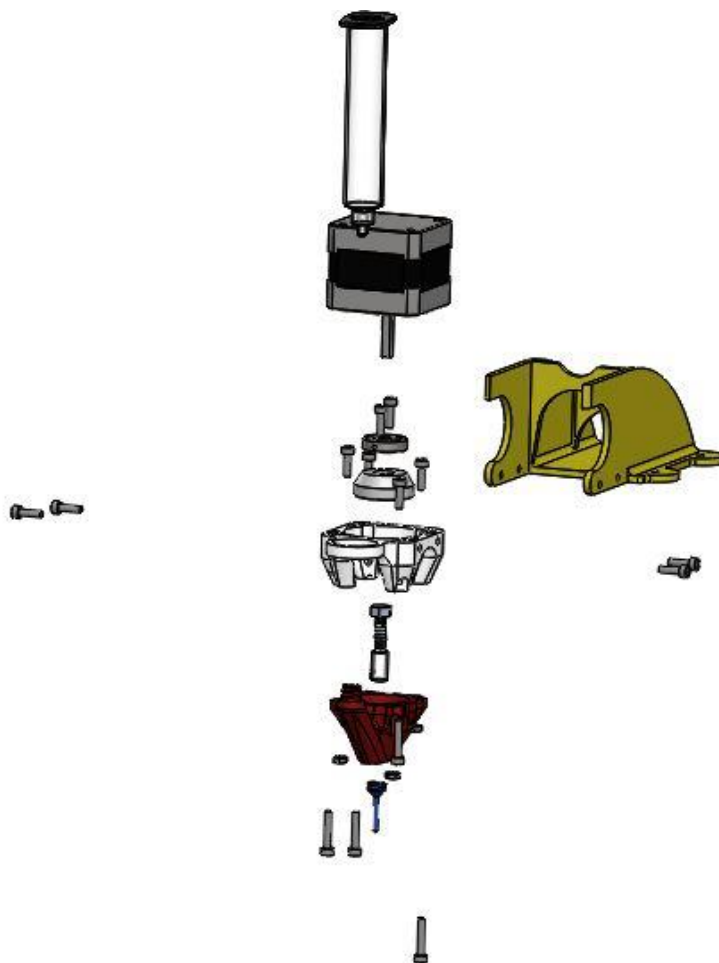


**Figura 5.25** Diferents vistes de l'adaptador a la impressora

### 5.4.7. Vista explotada de l'extrusor pneumàtic

En la següent imatge, es pot apreciar tot el sistema part per part, i a part de les peces creades per impressió 3D, es compona de les següents parts:

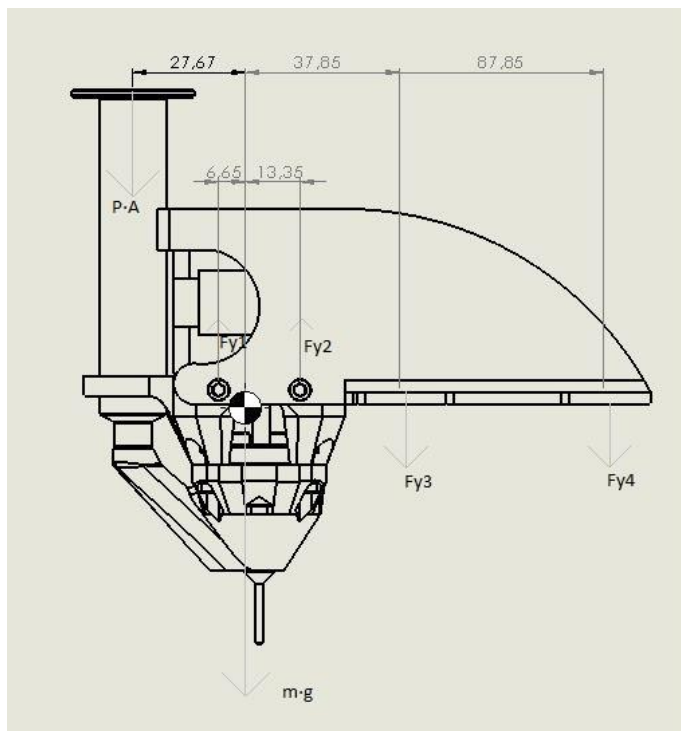
- 1 Xeringa de 10 cc
- 1 Motor pas a pas Nema 17 1,5 A
- 1 *pololu* presoner de 4 forats
- 1 Cargol M5 de 12mm
- 4 Cargols M3 de 14mm
- 8 Cargols M3 de 10mm
- 8 Femelles M3 de 4mm
- 1 boqueta *Nordson*



## 6. Anàlisi de les forces

Gràcies al treball de TFG titulat: “*Reologia de pastes ceràmiques per a impressió 3D*”, que s’ha dedicat a estudiar la reologia del carbur de tungstè, la qual ens ha permès conèixer que la viscositat dinàmica o absoluta és d’uns 44 mPa·s, i la seva densitat de  $14,8440 \pm 0,007 \text{ g/cm}^3$ . A partir d’aquestes dades, és pot conèixer la força necessària per tal d’extrudir la pasta d’interès. En altres paraules, permet conèixer la força que es necessita per empènyer un èmbol mitjançant un compressor d’aire.

En la **Figura 6.1**, és pot veure el diagrama del sòlid lliure on s’aprecia la repartició de forces en tot el sistema, des de la força que rep per part del compressor, fins la part del sistema des del centre de masses.



**Figura 6.1** Diagrama del sòlid lliure de les forces que s'apliquen al sistema

Per tal de resoldre el sistema, s’usarà:

$$\sum F_y = 0 \quad (4)$$

Joan Solans Martinez

$$\sum M_{y1}, M_{y2}, M_{y3}, M_{y4} = 0 \quad (5)$$

*Llei de Newton sobre la viscositat*

$$\tau = \mu \cdot \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

*Equacions de continuïtat: Forma integral de la conservació de la massa:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (8)$$

*Teorema de quantitat de moviment*

$$(p_1 - p_2) \frac{\pi D^2}{4} + \rho g \frac{\pi D^2}{4} \Delta x \sin \alpha - \tau \pi D \Delta x = 0 \quad (9)$$

Aquestes equacions són, per a acabar determinant, la pressió a la qual haurà de treballar el compressor per tal d'empènyer el fluid fins la sortida de l'extrusor.

Per tal d'aplicar aquestes fórmules, s'ha fet algunes consideracions.

- Es considera que el fluid es comporta com a fluid Newtonià
- Fluid incompressible
- Les parets de les seccions són completament llises.
- No hi ha pèrdues per canvi de secció
- Es considera que el fluid sempre treballa en l'eix y, per tant,  $\sin 90 = 1$
- S'ha simplificat el disseny a tubs completament rectilinis.

Dades:

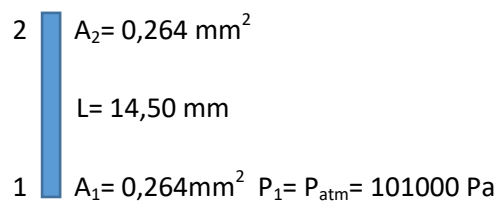
$$\mu = 44 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

$$\rho = 14,84 \text{ g/cm}^3$$

$$v = 1,5 \text{ mm/s}$$

$$Q = 0,396 \text{ mm}^3/\text{s}$$

Tram 1: Boqueta de sortida

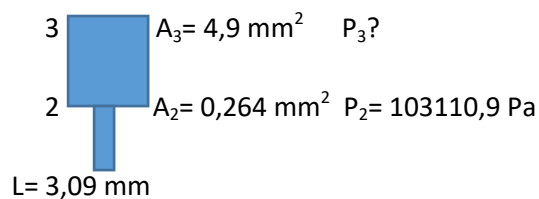


Amb l'expressió (9) aïllem  $P_2$ :

$$P_2 = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_1$$

$$P_2 = 103110,9 \text{ Pa}$$

Tram 2: Entrada al sistema



Amb l'expressió (8), trobem la velocitat en 3, la qual la usem en (6).

Joan Solans Martinez

$$A_2 \cdot v_2 = A_3 \cdot v_3$$

$$v_3 = \frac{A_2 \cdot v_2}{A_3} = 8,06 \cdot 10^{-2} m/s$$

$$\tau = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 8,06 \cdot 10^{-2} = 3,5 \cdot 10^{-3} Pa \cdot m$$

$$P_3 = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_2$$

$$P_3 = 103547,6 Pa$$

Tram 3:



4 D<sub>4</sub>= 5mm

P<sub>4</sub>?

3 D<sub>3</sub>= 2,5mm

P<sub>3</sub>= 103547,6 Pa

$$v_4 = \frac{A_3 \cdot v_3}{A_4} = 2 \cdot 10^{-2} m/s$$

$$\tau = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 8,8 \cdot 10^{-4} Pa \cdot m$$

$$P_4 = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_3$$

$$P_4 = 104129,91 Pa$$

Tram 4: Secció abans d'entrar a la secció del cargol



5

D<sub>5</sub>= 0,693 mm



4  $D_4 = 5 \text{ mm}$

$$v_5 = \frac{A_4 \cdot v_4}{A_5} = 1,04 \text{ m/s}$$

$$\tau = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 1,04 = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}$$

$$P_5 = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_4$$

$$P_5 = 104245,5 \text{ Pa}$$

Tram 5: Conducte del Cargol

Per tal de fer aquest tram, s'ha calculat el perímetre des del centre del Toroide durant totes les voltes que fa abans d'arribar a l'orifici.

6  
L= 72,25 mm  
5


$$A_5 = A_6 \text{ per tant } v_5 = v_6$$

$$P_6 = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_5$$

$$P_6 = 114685,3 \text{ Pa}$$

Tram 6: Sortim del mètric i entrem a la base

7  $D_7 = 2,28 \text{ mm}$   $P_7?$   $L = 1,43 \text{ mm}$

6   $D_6 = 0,693 \text{ mm}$


$$v_7 = \frac{A_6 \cdot v_6}{A_7} = 9,62 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$$

$$\tau = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 9,62 \cdot 10^{-2} = 4,22 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}$$

$$P_7 = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_6$$

$$P_7 = 114893,44 \text{ Pa}$$

#### Tram 7: Conduite de la base

8   $D_8 = 2,5 \text{ mm}$   $P_8?$

$L = 35,5 \text{ mm}$

7  $D_7 = 2,28 \text{ mm}$

$$A_7 \cdot v_7 \sim A_8 \cdot v_8$$

$$P_8 = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_7$$

$$P_8 = 120031,47 \text{ Pa}$$

#### Tram 8: Entrem a la xeringa





Joan Solans Martinez

9  $D_9=D_8= 2,5\text{mm}$

8  $L= 9,50\text{mm}$

$$P_9 = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_8$$

$$P_9 = 121414,22 \text{ Pa}$$

Tram 9

10  $D_{10}= 14,20\text{mm}$

9  $D_9= 2,50 \text{ mm}$

$$v_{10} = \frac{A_9 \cdot v_9}{A_{10}} = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\tau = 44 \cdot 10^{-3} \cdot 2,97 \cdot 10^{-3} = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}$$

$$P_{10} = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_9$$

$$P_{10} = 121850,96 \text{ Pa}$$

Tram 10: La xeringa



$A_{11}=A_{10}$  per tant  $v_{11}=v_{10}$

$L= 75,50\text{mm}$

Joan Solans Martinez

$$P_{11} = \frac{(\tau \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta x - \rho \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \Delta x \cdot \sin \alpha) \cdot 4}{\pi \cdot D^2} - P_{10}$$

$$P_{11} = 133424,59 \text{ Pa}$$

**$P_{11}$  = Pressió a l'entrada de la xeringa**

**Per tant,** per a saber la força que rebrà l'èmbol al començament de la xeringa serà el següent:

$$F_{\text{èmbol}} = P_{\text{èmbol}} \cdot A_{\text{xeringa}}$$

$$F_{\text{èmbol}} = 133424,59 \cdot \left(\frac{14,20 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot \pi = 21,2 \text{ N}$$

Tornant a les funcions (4) i (5), es formulen les següents equacions:

$$\sum F_y = 0$$

Considerant que el component en y de F1 i F2 són tant baixos que es menysprearan per els càlculs.

$$-P \cdot (213,82) - 2,98 - F_{y3} - F_{y4} = 0$$

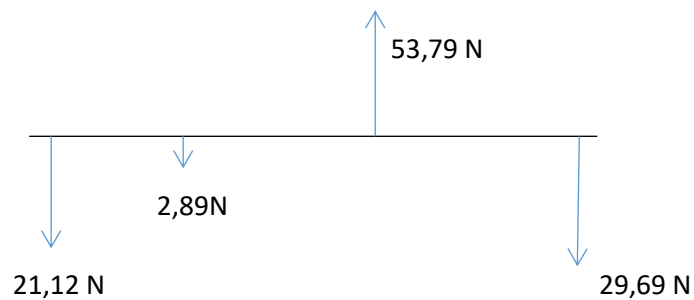
$$\sum M_{y3} = 0$$

$$0,05F_{y4} = 21,12 \cdot (0,0378 + 0,027) + 2,98 \cdot (0,039)$$

$$F_{y4} = 29,69 \text{ N}$$

$$F_{y3} = -53,79 \text{ N}$$

Ja que  $F_{y3}$  ha sortit negativa, realment la força actua en el sentit positiu de l'eix de les y.



## 7. Impacte ambiental

L'impacte ambiental de la realització del meu extrusor és molt petit, ja que, l'extrusor està dissenyat per tenir una vida d'uns 2 anys, doncs el plàstic es pot anar degradant.

L'extrusor està fet de:

153 g de PLA: L'impacte que té aquest plàstic, és des de que és matèria prima fins que fan les bobines per tal d'imprimir-lo, però també aquest materials són auto reciclables, és a dir, quan la peça de PLA ja no és útil, es fon per tal de tornar a crear noves bobines.

Motor pas a pas:

Aquest motor ha gastat energia i ha creat CO<sub>2</sub> per tal de fer-lo, però és un motor que té una vida útil d'uns 5 anys, el qual després es pot canviar les bobines o llençar-lo, és a dir, que l'impacte és menyspreable.

14 cargols que no es canvien excepte si es trenquen.

Pololu adaptador de l'eix no es canvia.

Pel que fa al material:

L'impacte mediambiental que crea el material és gairebé nul, ja que els processos realitzats per a la elaboració de mostres han estat nets, és a dir, sense utilitzar cap residu tòxic. Tot i que no s'hagin generat aquest tipus de residus, se n'han generat d'altres com plàstics, mostres mal impreses, consum excessiu d'aigua, paper, etc.

Un impacte ambiental que si que cal destacar és el consum d'energia degut a l'ús dels diferents instruments emprats per a la realització del treball. Els que més energia han consumit són els forn (tant el de 1450°C durant 4 hores com el de 90°C durant 24 h) ja que es requereix molta energia per a assolir aquesta temperatura i mantenir-la. Altres aparells com el reòmetre, el SpeedMixer o els aparells de microscòpia han gastat també una gran quantitat de recursos energètics, els quals provenen majoritàriament de combustibles fòssils que emeten CO<sub>2</sub> a l'atmosfera en el procés de combustió., al mateix temps que es redueixen les reserves dels recursos.

## 8. Conclusions

El desenvolupament del projecte s'ha dut a terme amb alguns entrebancs, però sempre s'ha aconseguit trobar el problema i solucionar-lo de la millor manera possible. És evident que a l'hora de dimensionar qualsevol cosa, és difícil aconseguir-ho perfecte a la primera, però tenir problemes a l'hora de realitzar-lo ha sigut en part favorable ja que n'he extret conclusions que no pensava que en tindria.

El moment més complex ha sigut a l'hora de definir el concepte del sistema pensant en les capacitats i les eines a l'abast. Intentant dissenyar amb materials convencionals, de fàcil adquisició, sent conscient en tot moment que havia de funcionar, que el que tenia al cap havia de passar a ser real en algun moment, utilitzant mètodes de manufactura a l'abast, tant econòmicament com d'accés.

Aquest sistema serà un avenç en la investigació d'aquesta universitat enfront al problema d'imprimir pastes ceràmiques per propers projectes.

Aquest es pot millorar per moltes bandes. Com he dit, el meu projecte ha sigut un primer apropament al que seria un projecte on s'hi gastin diners per tal de fer aquest disseny amb bons materials, on es puguin posar tubs calibrats, i no una goma, on es pugui fer els motlles amb un material que no sigui plàstic, etc.. Però com he dit, el projecte és una aproximació, amb un pressupost econòmic bastant baix, i amb un funcionament bastant bo.

Animo a millorar això ja que té un gran potencial, i per part meva he fet tot el que s'ha pogut però amb més temps i motivació es poden trobar moltes millores.

## 9. Pressupost i/o Anàlisi Econòmica

MATERIAL UTILITZAT			
Producte	Quantitat	Cost per unitat	Cost
Pluronic	0,45	200	90
Aigua destil·lada	1	1,35	1,35
Acetona	0,2	2,6	0,52
<b>SUBTOTAL</b>			<b>91,87</b>

Fabricació de peces del disseny			
Servei	Quantitat	Cost per unitat	Cost
Impressora 3D	40	15	600
PLA	0,3	20	6
Motor pas a pas	1	15	15
Pololu	1	6,5	6,5
Cargols M3 10mm	8	0,13	1,04
Cargols M3 14mm	4	0,15	0,6
Famelles M3	8	0,1	0,8
Xeringues 10 cc	2	80	160
Boquetes	6	60	360
<b>SUBTOTAL</b>			<b>1149,94</b>

ALTRES COSTOS			
Concepte	Quantitat	Cost per unitat	Cost
Material de laboratori			100,00 €
Ús del laboratori	30	20	600
<b>SUBTOTAL</b>			<b>700,00 €</b>

COST DE L'ENGINYERIA PER PART DEL PROJECTISTA			
Concepte	Quantitat	Cost per unitat	Cost
Disseny del material	100	30	3000
Prova de les peces	120	30	3600
Desenvolupament de la memòria	150	30	4500



<b>SUBTOTAL</b>	11100
-----------------	-------

<b>COST DE L'ENGINYERIA DE SUPORT</b>			
---------------------------------------	--	--	--

<b>Concepte</b>	<b>Quantitat</b>	<b>Cost per unitat</b>	<b>Cost</b>
Tècnic especialista Impressió 3D	50	15	750
Tutor del TFG	120	70	8400

<b>SUBTOTAL</b>	9150
-----------------	------

<b>COST TOTAL DEL PROJECTE</b>	
--------------------------------	--

<b>Concepte</b>	<b>Cost</b>
Cost total associat al material utilitzat	91,87
Cost total associat al disseny de les peces	1149,44
Cost total associat a altres costos	700,00 €
Cost total associat al cost de l'enginyeria	11100
Cost total associat al cost de l'enginyeria de suport	9150
<b>TOTAL (€)</b>	<b>22191,31</b>





## 11. Bibliografia

- [1] (18.1.2017). Estereolitografia. Wiquipedia.com.  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Estereolitograf%C3%ADa>
- [2] (21.3.2016). Sinterització. Viquipèdia.com.  
<https://ca.wikipedia.org/wiki/Sinteritzaci%C3%B3>
- [3] WASP. Worlds Avanced Saving Project.  
<http://www.wasproject.it/w/>
- [4] Treball de fi de grau. Ferran Crespo. 'Efectes de la porositat en les propietats mecàniques de la ceràmica a base d'òxid de zirconi obtinguts a través de la impressió 3D'. Abril de 2016
- [5] Treball fi de grau. Albert Moreno 'Caracterització micro-estructural i mecànica de multicapes base zircònia per impressió 3D'. Gener del 2016
- [6] Treball de fi de grau. Clara Navarro 'Reologia dels materials ceràmics per a la impressió 3D'. Maig 2017.
- [7] Síntesis de pigments ceràmics per el mètode Sol-Gel. Miguel Yesid Hernández Sánchez. 2013.  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/39725/1/79219018.2014.pdf>
- [8] Estereolitografia. 18 de Gener de 2017  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Estereolitograf%C3%ADa>
- [9] <http://es.3dilla.com/impresora-3d/estereolitografia/> 1/01/2015
- [10] Sinteritzat selectiu per làser. 25/4/2017.

[https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado\\_selectivo\\_por\\_l%C3%A1ser](https://es.wikipedia.org/wiki/Sinterizado_selectivo_por_l%C3%A1ser)

[11] Sinterització. 21/3/2016 <https://ca.wikipedia.org/wiki/Sinteritzaci%C3%B3>

[12] Las impresoras 3D también pueden con las cerámicas. El PAIS. 31.12.2015.  
[http://elpais.com/elpais/2015/12/31/ciencia/1451556922\\_109596.html](http://elpais.com/elpais/2015/12/31/ciencia/1451556922_109596.html)

[13] Guia definitiva para comprar comprar los mejores motores paso a paso. Staticboards.  
31.12.2015 <https://www.staticboards.es/blog/motores-paso-paso/>

[14] Materiales de impresión 3D: PLA (ácido Poliláctico). 12.3.2015.

<http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>

[15] Cargol d'Arquímedes. 4.06.2017. [https://ca.wikipedia.org/wiki/Cargol\\_d%27Arquimedes](https://ca.wikipedia.org/wiki/Cargol_d%27Arquimedes)

[16] Toroide. 11.05.2017. <https://ca.wikipedia.org/wiki/Toroide>

## Annex A

En aquest primer annex, hi adjuntaré tots els plànols del disseny de l'extrusor i els datasheet de les peces que no han estat creades.

Joan Solans Martinez